

Arttu Yli-Pietilä

PAALURYHMÄN JÄYKKYYDEN VAIKUTUS RUNGON SUUNNITTELUSSA

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Diplomityö
Syyskuu 2019

TIIVISTELMÄ

Arttu Yli-Pietilä: Paaluryhmän jäykkyyden vaikutus rungon suunnittelussa
Diplomityö, 71 sivua, 15 liitesivua
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Syyskuu 2019

Paaluperustusta käsitellään tavallisesti rungon rakennesuunnittelussa joko täysin jäykkänä tai nivelellisenä liitoksena. Todellisuudessa paalutuksen joustavuuden seurauksena paalutetun perustuksen rakennemalli on täysin jäykän ja nivelellisen liitoksen välimuoto. Tässä tutkimuksessa selvitetään millaisia vaikutuksia paaluryhmän jäykkyyden huomioon ottaminen tuo kehärakenteisen rungon rakennesuunnitteluun. Työ koostuu kirjallisuustutkimuksesta sekä laskennallisesta osuudesta. Kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan tukipaaluperustusten suunnittelun periaatteita sekä paaluryhmän jäykkyyden määrittämistä siirtymämenetelmään perustuen. Kirjallisuuskatsauksessa käsitellään myös paaluperustuksen vaikutuksia rakennusrungolle aikaisempiin tutkimuksiin perustuen. Työn laskennallisessa osuudessa tarkastellaan paaluperustuksen jäykkyyden vaikutusta tavanomaisen teräsrakenteisen turbiinihallin pääkehän suunnittelussa. Paalutuksen jäykkyyden vaikutuksia tutkitaan jäykkäkantaisten ja -nurkkaisen teräspilareista ja ristikosta muodostuvan kehän sisäisten rasiitusten, stabiiliiteetin ja siirtymän suhteen.

Tutkimuksessa paaluperustuksen jäykkyyttä kuvataan rakenteellisten jousien tavoin. Tukipaalutusta käsitellään työssä ristikkorakenteena, jossa nivelellisesti päistään tuettuina sauvoina tarkasteltuihin paaluihin syntyy perustukseen kohdistuvien rasiitusten seurauksena aksiaalisuuntainen muodonmuutos. 2D-tasossa tarkastellun paalutuksen jousivakiot määritetään paaluanturan liiketilan perusteella, kun tunnetaan paalutusta rasittavat voimat sekä niiden aiheuttamat siirtymät ja kiertymä. Näin selvitetty jousivakiot mallinnetaan FEM-laskentaohjelmassa perustusliitoksen vapautuksiksi kehän pysty- ja vaakasuunnassa sekä kiertymän suhteen, jolloin joustavan ja täysin jäykän perustustuennan eroavaisuuksia rungon rakennemallissa voidaan vertailla. Tasopaalutuksen yksinkertaistettua jousina kuvattua mallinnustapaa verrataan myös rakennemalliin, jossa paaluperustus on mallinnettu kokonaisuudessaan aksiaalijäykkyyttään vastaavina jousina kytkettynä laattana mallinnetun anturan välityksellä tasokehän pilarien perustusliitokseen.

Tutkimuksen perusteella vino- ja pystypaaluista koostuvalle paaluryhmälle ei yleensä voida määrittää vakiojäykkyyksiä perustusliitoksessa, koska paaluanturan liiketila on voimakkaasti riippuvainen taivutusmomentin ja leikkausvoiman vuorovaikutuksesta, mikäli tarkastelutaso poikkeaa paalutuksen kiertoakeskiöstä. Näin ollen tasopaalutuksen kuvaaminen kolmella jousella havaittiin käytännön suunnittelun kannalta melko epäkäytännölliseksi mallinnustavaksi, koska näin määriteltynä paalutuksen jäykkyys muuttuu kuormitusyhdistelmäkohtaisesti. Tällöin paalutuksen kokonaisvaltainen mallintaminen on rungon rakenneanalyysin kannalta käyttökelpoisempi menetelmä paaluryhmän jäykkyyden huomioon ottamiseksi.

Tutkimuksen mukaan paaluperustuksen jäykkyyden huomioon ottaminen johtaa rungon sisäisten rasiitusten uudelleenjakautumiseen. Tarkasteltaessa kattotasoltaan tuettua jäykkäkantaista ja -nurkkaista kehää havaitaan rungon rasiitusjakauman siirtyvän enemmän kehän yläosan jäykille nurkille sekä kattotason jäykistysjärjestelmälle paaluperustuksen joustavuuden seurauksena. Tällöin perustusta rasittavan taivutusmomentin ja leikkausvoiman havaitaan pienenevän. Tutkimuksessa tarkasteltujen paalutusten joustavuuden seurauksena kehän pilareiden perustusliitoksessa vaikuttavan taivutusmomentin havaittiin pienenevän n. 1-10% ja pilarien yläpään maksimitaivutusmomenttien ristikon alapaarteen tasossa havaittiin kasvavan n. 1-5% verrattuna täysin jäykkien perustusliitosten mukaiseen rakennemalliin.

Tutkimuksen perusteella paaluperustuksen joustavuuden havaitaan kasvattavan pilarin nurjahduspituutta. Tarkasteltujen paalutuksien joustavuuden seurauksena pilarin nurjahduspituuden havaittiin kasvavan n. 1-3%. Paaluperustuksen joustavuuden havaittiin myös korostavan runkoon muodostuvia siirtymiä. Tutkittujen paalutuksien joustavuuden vaikutuksesta kehän vaakasuuntaisen siirtymän havaittiin kasvavan n. 1-6%. Tutkittaessa eri jäykkyyden omaavia paalutuksia havaittiin paaluperustuksen joustavuuden epälineaarinen vaikutus tutkituille suureille. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että suhteessa alhaisemman jäykkyyden omaavilla paalutuksilla jäykkyyden muuttuminen saa aikaan verrattain suuremman vaikutuksen rungossa kuin jäykemmillä paalutuksilla.

Avainsanat: Tukipaalu, paaluperustus, paaluryhmä, paaluantura, paaluryhmän jäykkyys

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Arttu Yli-Pietilä: The effect of pile group stiffness in structural frame design

Master of Science Thesis, 71 pages, 15 Appendix pages

Tampere University

Master's Degree Programme in Civil Engineering

September 2019

Pile foundations are normally analyzed as a completely rigid or hinged joints in structural frames design. As a matter of fact, the loading on the foundation results deformation whereby the structural model of pile group is an intermediate form of rigid and hinged joint. This study investigates the effect of end-bearing pile group stiffness in design of structural frame. The research consists of the literature review and the computational part. The literature review examines the principles of pile foundation design and the determination of the stiffness of pile group based on the transition method. The literature review also discusses the effects of pile foundation on the building frame based on previous research. The computational part of the thesis examines the effect of the stiffness of pile foundation on the design of the main frame of a conventional turbine hall. The frame considered in the study consists of the steel columns and truss. The effects of pile group stiffness are investigated in terms of internal forces, stability and displacement of the building frame.

The rigidity of pile group is modelled in the study as structural springs. The structural model of pile foundation is considered as a planar truss structure in which the end-bearing piles are treated with hinged ends. The pile foundation and the building frame are considered in 2D plane. The spring constants (vertical, horizontal and rotational) of the pile group are determined by the state of motion of the completely rigid pile cap. The spring constants of the pile group are modelled as the release of the foundation connection of the frame in the FEM-program. Hence the difference between the completely rigid foundation connection and the flexible foundation can be evaluated in the design of building frame. The simplified three-spring modeling method of pile group is compared to a structural model in which the entire pile group and concrete cap are modeled and connected to the frame.

According to the study, it is not usually possible to determine a constant stiffness for a group of battered and vertical piles at the level of foundation, because the state of motion of the pile foundation is strongly dependent on the interaction of bending moment and shear force if the reference level differs from the center of rotation of the pile group. Thus, the three-spring modeling of planar pile group was found to be rather impractical modeling approach in the structural design, as the stiffness of pile group varies according to the load combination. In this case, comprehensive pile group modeling is a more useful method for the structural analysis of the building frame.

According to the study, consideration of the stiffness of the pile foundation results in a redistribution of internal forces in the building frame. It is found that the force distribution of the frame is shifted more to the rigid corners of the upper part of frame and to the roof stiffening system of the building frame due to the flexibility of the pile foundation. In this case, the bending moment and shear force on the foundation level are observed to decrease compared to the completely rigid foundation. As a result of the flexibility of the pile groups examined in the study, the bending moment acting on the foundation level was found to decrease about 1-10% and the bending moment on the upper part of the column at the level of the bottom chord of the truss was observed to increase by approximately 1-5% compared to the structural model with the completely rigid foundation connections.

According to the study, the flexibility of the pile foundation is observed to increase the buckling length of the frame column. As a result of the flexibility of the pile groups examined the buckling length of the column was found increase about 1-3%. The flexibility of the pile foundation was also observed to increase the deformation of the frame. As a result of the flexibility of the pile groups studied the horizontal displacement of the frame was found to increase about 1-6%. When examining pile groups with different stiffnesses, a nonlinear effect of the pile group flexibility on the measured quantities is observed. Based on the study, it can be stated that with lower stiffness pile groups, the change in stiffness produces a relatively greater effect on the frame than with stiffer pile groups.

Keywords: End-bearing pile, pile foundation, pile group, pile cap, pile group stiffness

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä työ on suoritettu A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n toimeksiantona osana Tampereen yliopiston Rakennustekniikan koulutusohjelman maisterivaiheen opintoja.

Työn ohjaajina toimivat DI Arto Hokkanen ja DI Ville Laine sekä tarkastajina professori Anssi Laaksonen ja yliopistonlehtori Olli Kerokoski. Haluan esittää kiitokseni työn ohjaajille tutkimuksen edetessä saaduista arvokkaista ohjeista ja neuvoista. Erityisesti haluan kiittää Arto Hokkasta työn aiheen ideoinnista sekä erinomaisesta ohjauksesta.

Lisäksi haluan kiittää myös perhettäni saamastani kannustuksesta ja tuesta opintojeni varrella. Erityisesti kiitos kuuluu avopuolisolleni Terhille korvaamattomasta tuesta arkisen ahertamisen rinnalla.

Espoossa, 23.9.2019



Arttu Yli-Pietilä

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO.....	1
1.1	Tutkimuksen tausta.....	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset.....	1
1.3	Tutkimuksen suoritus ja rakenne.....	2
2.	TUKIPAALUPERUSTUKSET.....	3
2.1	Rakennemalli.....	3
2.2	Paaluvoimien laskenta	5
2.2.1	Pystypaaluryhmä.....	6
2.2.2	Staattisesti määrätty paalutus.....	7
2.2.3	Siirtymämenetelmä	8
2.3	Paaluryhmän suunnittelu.....	12
2.3.1	Paalutuksen kiertokeskiö ja pääjäykkyudet.....	13
2.3.2	Paalujen sijoittelu.....	15
2.3.3	Vinopaalut	16
2.3.4	Stabiili paaluryhmä	17
2.3.5	Sijainti- ja mittapoikkeamat	18
2.4	Paaluantura.....	20
2.4.1	Mitoituksen periaatteet.....	20
2.4.2	Jäykkä vai joustava paaluantura	23
3.	PAALUPERUSTUS OSANA RAKENNEJÄRJESTELMÄÄ	29
3.1	Paaluille perustettu rakennusrunko.....	29
3.2	Paalutuksen kuvaaminen jousilla	33
3.3	Paalutuksen vaikutus rungon stabiliteetille.....	35
4.	CASE: TURBIINIHALLI	39
4.1	Pääkehän rakennemalli	39
4.2	Paaluperustus.....	41
4.2.1	Paalutuksen laskenta	42
4.2.2	Paalutuksen jäykkyys.....	46
4.3	Rungon sisäiset rasitukset	52
4.3.1	Paalutuksen mallinnustapojen vertailu.....	57
4.3.2	Paalupituuden vaikutus	58
4.3.3	Paalujen välisen etäisyyden vaikutus.....	61
4.4	Rungon stabiliteetti.....	63
4.5	Rungon siirtymä	65
5.	YHTEENVETO.....	68
	LÄHTEET	72
	LIITE A: Jousituetun sauvan nurjahdusanalyysi	
	LIITE B: Tasokehän RFEM-laskentaraaportti	

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Kun kantava maakerros on syvällä, ei maanvaraisten perustamisratkaisujen käyttö ole mahdollista, jolloin paaluille perustaminen on käytännössä ainoa taloudellinen perustamisvaihtoehto. Nykyään rakentamisen suuntautuessa yhä enemmän pohjaolosuhteiltaan haastavillekin alueille on paalutettujen perustusten käyttäminen yleistä.

Rakennusrungon analysoinnissa paaluperustusten vaikutusta yksinkertaistetaan tavallisesti käytännön rakennesuunnittelussa. Useimmiten paaluperustus otaksutaan rakennemallissa joko täysin jäykäksi tueksi tai niveltueksi. Todellisuudessa paalutetun perustuksen jäykkyys on nivelellisen liitoksen ja täysin jäykän liitoksen välimuoto. Paalutettuun perustukseen syntyy kuormitusten seurauksena muodonmuutoksia, jolloin perustusliitosta voidaan kuvata rakennemallissa anturan liiketilan perusteella määritetyillä jousilla.

Paaluperustusten suunnittelussa yksinkertaistamiseen johtaa osaltaan myös eri suunnittelualojen rajapinnassa toimiminen. Paaluperustuksen rakenneteknisessä suunnittelussa käytetään kohteen geoteknisen suunnittelijan määrittelemiä lähtötietoja. Täysin poikkeuksellista ei ole sekään, että perustusten rakennesuunnittelun tekee eri suunnittelija kuin rakennusrungon suunnittelija.

Paaluperustusten jäykkyyden yksinkertaistaminen rungon rakennemallissa saattaa johtaa tarpeettoman suuriin rasituksiin, jolloin myös käytetyt rakenteet muodostuvat järeiksi. Rakennemallin yksinkertaistus saattaa johtaa myös ylimääräiseen suunnittelutyöhön, jos rungon rakennejärjestelmässä määrittäviä tilanteita etsitään vertaamalla erikseen täysin jäykästi tai nivelellisesti perustettua runkoa.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää tukipaalutetun anturan jäykkyyden vaikutus hypertaattisen rungon rakennesuunnittelulle. Olennaisin tavoite tutkimukselle on selvittää, onko paalutetun perustusliitoksen tarkempi huomioon ottaminen perusteltua tavallisessa kohteessa, vai onko perustusliitoksen yksinkertaistaminen rungon suunnittelussa kannattavampaa.

Tutkimus rajataan rungon rakennesuunniteluun, jättäen maamekaniikan tutkiminen rajauksen ulkopuolelle. Tällöin tarkastellaan ideaalijäykkää tukipaaluin perustettua paaluanturaa. Paalutuksen osalta tutkimus rajataan käsittelemään tukipaaluista muodostettuja

pienpaaluryhmiä. Tutkimuksen laskennallinen osuus painottuu teräsbetonisten tukipaalujen tarkasteluun. Maan sivuttaisvastusta ei oteta paalutusta tarkasteltaessa huomioon, vaan vaakakuormitukset suunnitellaan vastaanotettaviksi vinopaaluilla. Tutkimuksessa paalujen vaippavastusta ei oteta huomioon paalutuksen pystysuuntaisessa jäykkyydessä. Tutkimuksen rajauksen ulkopuolelle jätetään myös paaluanturan yksityiskohtainen mitoittaminen.

Tutkimus rajataan käsittelemään ensisijaisesti rungon päärakenneosien poikkileikkauksia, jolloin liitosten suunnittelu jätetään rajauksen ulkopuolelle. Tutkimuksessa käsiteltävän runkotyyppin jäykistämisessä ei hyödynnetä seinälinjoja tai jäykistäviä kuiluja. Tällöin tutkimus kohdistuu kehärakenteisiin runkoihin, joissa paalutuksen vaikutusta tutkitaan pilarien perustuksissa. Tutkimuksessa rakenteiden sisäiset rasitukset oletetaan jakautuvan kimmoisesti.

Tutkimuksessa paalutuksen tarkastelu suoritetaan teoreettisesti, jolloin pohjatutkimuksien ja paalutuksen tarkemittauksien käytännön vaikutukset paalutuksen suunnitteluun eivät sisälly tutkimuksen toteutukseen. Tutkimuksessa ei esitellä yleisiä suunnitteluperusteita rakenteiden materiaalien tai kuormitusten osalta. Tutkimuksessa rakenteiden suunnittelu toteutetaan eurokoodien mukaan.

1.3 Tutkimuksen suoritus ja rakenne

Tutkimusmenetelminä käytetään kirjallisuustutkimusta sekä laskennallista tutkimusta, jossa hyödynnetään dlubal RFEM-laskentaohjelmaa (vs. 5.17.01). Kirjallisuustutkimusta käytetään paaluanturan jäykkyyden määrittämisen sekä tukipaalutuksen suunnittelun periaatteiden tarkastelussa. Kirjallisuustutkimusta hyödynnetään myös tarkasteltaessa paaluperustuksen vaikutuksia osana rakennusrunkoa.

Tutkimuksen laskennallisessa osassa tasopaalutuksen jäykkyyttä vastaavat jousivakiot määritetään taulukkolaskentaohjelmalla (MS Office Excel, vs. 1907). Paalutuksen laskennan myötä ratkaistuja jousivakiota hyödynnetään rakenteen FEM-laskentamallissa perustusliitoksen vapautuksina. Paalutuksen vaikutusta rungon suunnittelussa tarkastellaan myös mallintaen paaluperustus kokonaisuudessaan laskentamalliin kytkettynä runkoon. Laskennallisessa osassa paalutuksen jäykkyyden vaikutusta tutkitaan teräksisen pilari-ristikko-kehän sisäisille rasituksille, stabiliteetille ja siirtymälle.

2. TUKIPAALUPERUSTUKSET

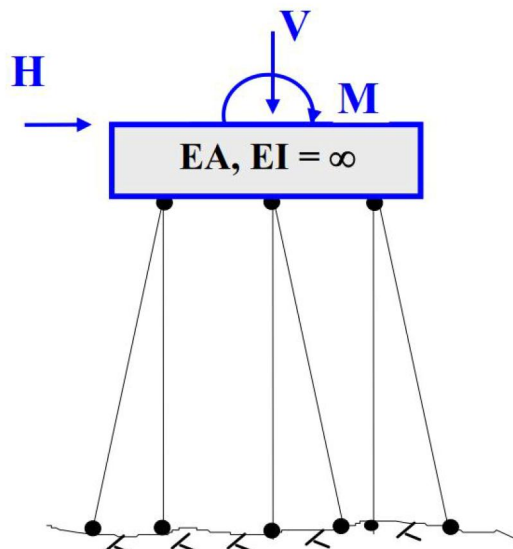
Paaluperustuksia käytetään silloin, kun kantava maakerros on niin syvällä, ettei maanvaraisten perustusten käyttäminen ole mahdollista tai kustannustehokasta. Suomen pohjaolosuhteissa käytetyt paalut ovat lähes aina tyypiltään tukipaaluja. (Runkorakenteet, Betoniteollisuus ry, 2010, s.17) Tukipaalu nimitystä käytetään paaluille, jotka siirtävät kannattelevansa rakenteen kuorman pääsääntöisesti paalun kärjen välityksellä kalliolle tai kantavalle maakerrokselle. Suomessa käytetyt tukipaalutyypit ovat teräsbetonipaalu, teräspaalu sekä puupaalu, joskin viimeisimmän käyttö on nykyään vähäistä kohdistuen lähinnä kunnallistekniikkaan ja tienrakennukseen. (Jääskeläinen, 2003, s. 38)

Paalun rakenne määritellään toteutuksen huomioivan paalutustyöluokan perusteella. Käytettävä paalutustyöluokka määräytyy kohteen geoteknisen luokan sekä seuraamusluokan mukaisesti. Paalutustyöluokat on jaettu kohteen vaativuuden mukaan kolmeen luokkaan PTL1...PTL3, joista suurimmat vaatimukset ovat luokassa PTL3. (RIL 254-1-2016, s.101, 102)

Paalujen kantavuus määritellään geoteknisen kestävyys ja rakenteellisen kestävyys perusteella. Usein määräävämmäksi tekijäksi paalun kantavuudessa muodostuu geotekninen kestävyys, mutta pehmeissä maakerroksissa voi paalun rakenteellinen kestävyys olla mitoittava. (RIL 254-1-2016, s.121) Yleensä perustusten rakennesuunnittelussa paalun kantavuuden arvona käytetään geoteknisen suunnittelijan määrittelemää kapasiteettia.

2.1 Rakennemalli

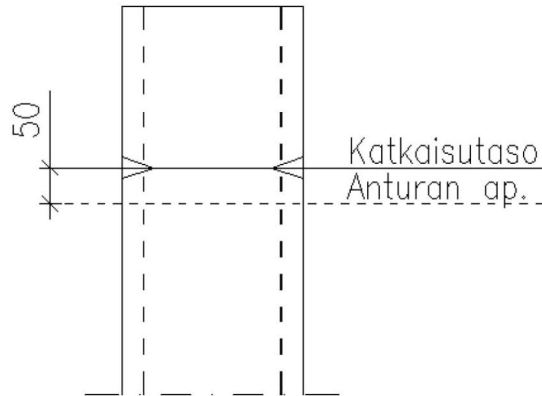
Tukipaaluperustusta käsitellään tyypillisesti ristikkorakennemallina, jossa paalut toimivat nivelpäisinä sauvoina kuvan 1 mukaisesti. Paalut ovat tavallisesti puristettuja rakenneosia, jolloin niitä ei tarvitse ankkuroida paaluanturaan. Tällöin paalujen liitosta anturaan voidaan laskennallisesti käsitellä nivelellisenä. (Jutila et al 2014, s.28)



Kuva 1. Tukipaaluperustuksen rakennemalli. (Jutla et al 2014, s.28, muokattu)

Poikittaisten rasiutusten vaikutus paaluille voidaan usein jättää huomioimatta, sillä niiden vaikutus on löyhissä maaperissä verrattain vähäinen. Kuitenkin esimerkiksi penkereiden alle suuntautuvissa vinopaaluissa maan aiheuttaman poikittaisten rasiutuksen huomiointi on oleellista, joskin tällaisia paalutuksia pyritäänkin yleensä välttämään. Kitkan ja koheesion vaikutuksia ei tyypillisesti huomioida tukipaalujen rasiutusjakaumassa, vaan paaluvoiman oletetaan pysyvän vakiona koko paalun pituudella. (Jutla et al 2014, s.28, 50)

Paalutuksen rakennemallissa paalut yhdistävä antura oletetaan rakenteellisesti täysin jäykäksi laataksi, joka sitoo paalut yhtenäiseksi paaluryhmäksi. (RIL 121-2004, s.91) Paalut katkaistaan siten, että ne yltävät vähintään 50 mm paaluanturan alapinnan yläpuolelle kuvan 2 mukaisesti, jolloin paalun liitosta anturaan käsitellään nivelellisenä. Teräsbetoniset paalut voidaan liittää jäykästi anturaan paljastamalla paalun pitkittäisteräksiset tartuntapituuden verran ja ankkuroimalla ne anturaan. Vastaavasti betonoitujen teräspalkkipaalujen jäykkä liitos anturaan voidaan toteuttaa ylipitkillä pitkittäisteräksillä, jotka ankkuroidaan anturaan. (RIL-166, 1986, s. 210, RIL 254-2016, s.176, 178, 179) Paalun upotussyvyys ei saisi kuitenkaan muodostua anturaan suunniteltua pidemmäksi läpityöntymisvaaran vuoksi. (Jääskeläinen, 2003, s.56)



Kuva 2. Teräsbetonipaalun nivelellinen liitos anturaan. (Betoniteollisuus ry, Eurokoodin ja PO-2011 mukaiset vakiopaaluanturat, 2012, s. 13)

Todellisessa tilanteessa paalun yläpään sivusiirtymää vastustavat paalua ympäröivän maan sivuvastus, paalun leikkaus- ja taivutusjäykkyys sekä yläpuolisen rakenteen jäykkyys. Paalun alapään kiinnitysaste heikkenee paalun lyhentyessä, jolloin riittävän lyhyt paalu siirtyy lopulta jäykän pilarin tavoin. Normaaliolosuhteissa jäykkänä toimivan paalun pituutena käytetään yleensä 10-12 kertaa paalun poikkileikkauksen halkaisijaa tai sivun pituutta. (LPO-87, 1991, s. 100) Mikäli paalun pituus on alle 3 metriä, tulee se liittää jäykästi yläpuoliseen rakenteeseen. (RT-Betonipaalut Tuotelehti PO-2016, 2018, s.11, ja SSAB, RR- ja RD-paalut, Suunnittelu- ja asennusohjeet, s.23) Yleisen suunnittelukäytännön mukaan vinopaalut liitetään aina jäykästi anturaan, jotta perustukseen kohdistuvien vaakakuormitusten siirtyminen paaluille saadaan varmistettua ja anturan lohkeamisvaaralta vältetään.

2.2 Paaluvoimien laskenta

Ennen laskentaohjelmien yleistymistä paaluperustusten paaluvoimia on määritetty yksinkertaisin käsin laskennan menetelmin. Paaluvoimien laskentaan on kehitetty muun muassa erilaisia graafisia menetelmiä, jotka soveltuvat varsin yksinkertaisiin paalutuksiin.

Kun paaluperustuksen kuormitus koostuu pystyvoimien lisäksi merkittävistä vaakavoimista ja taivutusmomenteista, muodostuu paaluvoimienkin laskenta haasteellisemmaksi. 1960-luvulta lähtien paaluvoimien laskennassa on otettu käyttöön matriisiyhtälöihin perustuvia ratkaisumalleja, joilla paaluvoimien määrittäminen onnistuu systemaattisesti monimutkaisillekin paalutuksille. (Bowles, 1997, pp. 1040) Tässä työssä paalutuksen laskennallisessa tarkastelussa käytetään Jutila et al. (2014) esittämää siirtymämenetelmään perustuvaa ratkaisua, jota on käsitelty tarkemmin luvussa 2.2.3.

Paaluperustuksen rakenteellisen toiminnan kannalta keskeinen alkuoletus on paalut yhdistävän paaluanturan jäykkyyden huomioiminen. Yleensä paalutuksen laskentaperiaat-

teissa paaluantura oletetaan äärettömän jäykäksi kappaleeksi. Tähän oletukseen perustuvat myös tässä luvussa käsitellyt laskentamenetelmät. Luvussa 2.4.2 on esitelty paaluanturan taipuisuuden vaikutusta paalutuksen suunnittelussa tarkemmin.

Tässä tutkimuksessa käytetyssä laskentamenetelmässä paaluja käsitellään päistään nivellisinä sauvoina, jolloin paalun mitoitus suoritetaan yksinomaan normaalivoiman suhteen, eikä paalujen teoreettista momenttikapasiteettia oteta tarkasteluissa huomioon.

2.2.1 Pystypaaluryhmä

Yksinkertaisimmillaan paaluvoimien laskenta on paaluryhmillä, joiden kuormitus koostuu pelkästään pystysuorista rasituksista. Tällöin paaluryhmä voidaan muodostaa ainoastaan pystysuorista paaluista. Jos paaluilla on samat jäykkyydet ja paalujen sijoittelu kuormitukseen nähden on symmetrinen, voidaan yhden paalun rasitus laskea yksinkertaisesti kaavasta

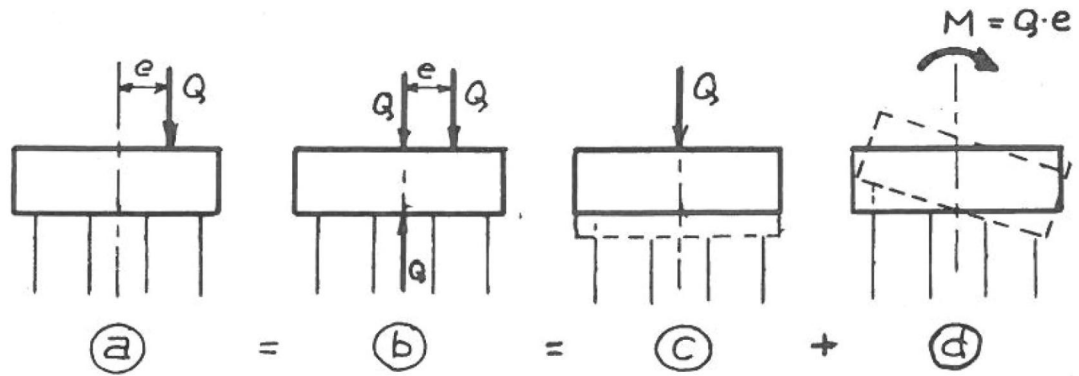
$$P = \frac{Q}{n} \quad (2.1)$$

missä P on yhden paalun paalukuorma, Q on paaluryhmään kohdistuva keskeinen pystysuora kuormitusresultantti ja n on paaluryhmän paalujen lukumäärä. (Rantamäki & Tamminen, 2002, s.66)

Mikäli kuormitus kohdistuu paaluryhmän painopisteeseen nähden epäkeskisesti, voidaan tapauksesta syntyvä momentti ottaa huomioon kuvan 3 mukaisesti kahdella erillisellä kuormitustilanteella. Tällöin yksittäisen paalun rasitus voidaan esittää muodossa

$$P_i = \frac{Q}{n} + \frac{Qer_i}{\sum a_i r_i^2} \quad (2.2)$$

missä e on kuormitusresultantin epäkeskeisyys, r_i on paalurivin etäisyys paaluryhmän painopisteestä ja a_i on paalurivin paalujen lukumäärä. (Rantamäki & Tamminen, 2002, s.67)



Kuva 3. Epäkeskisen kuorman aiheuttamien paaluvoimien määrittäminen. (Rantamäki & Tammirinne, 2002, s.66)

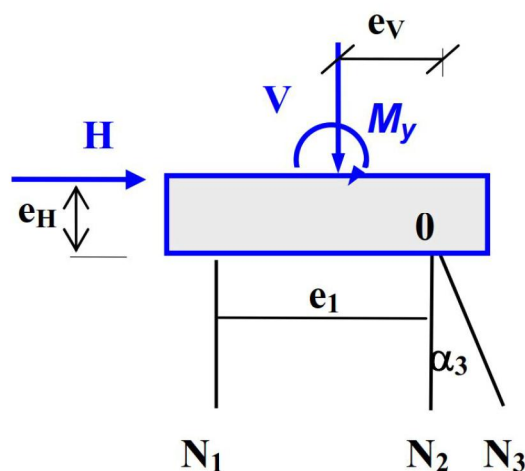
Kuormitusresultantin ollessa epäkeskinen paalutuksen molempien painopisteakselien suhteen lasketaan yksittäisen paalun rasitus kaavasta

$$P_i = \frac{Q}{n} + \frac{Q e_x r_x}{\sum a r_x^2} + \frac{Q e_y r_y}{\sum b r_y^2} \quad (2.3)$$

missä a ja b ovat paalujen lukumäärät paaluriveissä.

2.2.2 Staattisesti määrätty paalutus

Tasopaalutus on staattisesti määrätty, jos se koostuu tasan kolmesta paalurivistä, ja on suunniteltu siten, että paalutuksella on jäykkyyttä kaikkia siihen kohdistuvia kuormituksia vastaan kuten kuvassa 4 esitetyssä paalutuksessa. Tällöin paaluvoimat voidaan ratkaista paaluanturan voima- ja momenttitasapainoyhtälöistä. Momenttiyhtälön toteutuessa tason mielivaltaisessa pisteessä, saadaan sopivalla 0-pisteen valinnalla ratkaistua paaluvoimat helposti. (Jutila et al 2014, s.34, Helenelund, 1980, s.104)



Kuva 4. Staattisesti määrätty tasopaalutus (Jutila et al 2014, s.34)

Kuvan 4 kaltaista paalutusta käsitellään tässä tapauksessa teoreettisena esimerkkinä. Esitetty epäsymmetrinen paalutus on käyttökelpoinen, mikäli vaakakuormitus on luonteeltaan pysyvää muodostuen esimerkiksi maanpaineen vaikutuksesta. Kuitenkin pystykuormituksen suhteen tarkasteltuna esitetyn paalutuksen painopisteen olisi kannattavampaa sijaita lähempänä kuorman vaikutusakselia.

Mikäli paalutus on muodostettu yli kolmesta erisuuntaisesta paalurivistä, on paalutus staattisesti määrämätön, jolloin paaluvoimien ratkaisuun voidaan käyttää esimerkiksi luvussa 2.2.3 esitettyä siirtymämenetelmää.

2.2.3 Siirtymämenetelmä

Paaluperustusten toimiessa runkoa jäykistävinä rakenteina tulee niiden rasituksiksi pystykuorman lisäksi myös merkittäviä vaakakuormituksia sekä taivutusmomentteja. Tällöin paalutussuuntia on luonnollisesti useampia, jolloin myös paalutuksen laskenta on mielekkäämpää suorittaa siirtymämenetelmään pohjautuvalla laskentatavalla.

Tukipaalun normaalijännitys ratkaistaan Hooken lain perusteella paalun kimmokertoimen E ja suhteellisen muodonmuutoksen ε tulosta

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.4)$$

Merkitään paalun ylä- ja alapään siirtymiä muuttujilla Δ_1 ja Δ_2 , jolloin suhteellinen muodonmuutos paalun pituudella L voidaan ilmoittaa $\varepsilon = (\Delta_2 - \Delta_1)/L$. Paalussa vallitseva normaalivoima ratkaistaan normaalijännityksen σ ja paalun poikkipinta-alan A tulosta, jolloin paalun normaalivoiman lauseke voidaan kirjoittaa muodossa

$$N = \frac{EA}{L} (\Delta_2 - \Delta_1) \quad (2.5)$$

Tukipaalujen tukeutuessa tavallisesti kallioon, voidaan paalun alapään siirtymä Δ_2 olettaa arvoltaan nollassi. Kun lisäksi oletetaan paaluvoima positiiviseksi suureeksi sekä merkitään paalun jäykkyyttä muuttujalla $k = EA/L$, voidaan yhtälö (2.5) kirjoittaa muodossa

$$N = k\Delta_1 \quad (2.6)$$

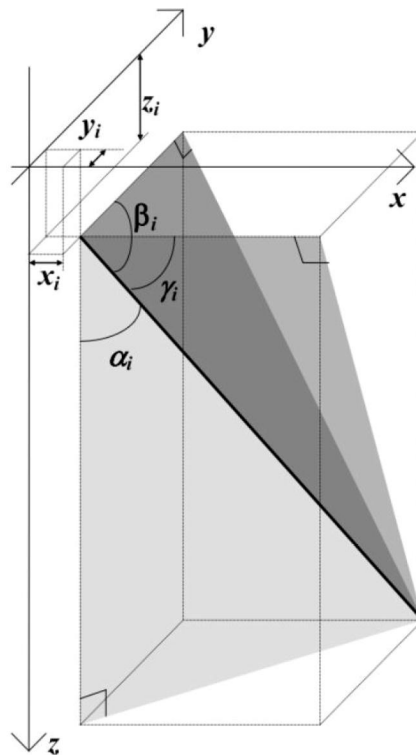
Yksittäisen paalun yläpään aksiaalinen siirtymä Δ_1 saadaan ratkaistua, kun tunnetaan koko paalutuksen yhdistävän täysin jäyäksi kappaleeksi oletetun anturan siirtymät tietyssä pisteessä. Paaluanturan tarkasteltavan pisteen siirtymät saadaan ratkaistua matriisiyhtälöstä

$$[K]\{\delta\} = \{f\} \quad (2.7)$$

missä $[K]$ on paalutuksen jäykkyysmatriisi, $\{\delta\}$ on tarkastelupisteen siirtymävektori ja $\{f\}$ on paalutusta rasittava voimavektori. Tämä yleinen voimien ja siirtymien välinen yhteys esitetään kolmiulotteiselle avaruuspaalutukselle yhden paalun osalta matriisiyhtälönä

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{12} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{13} & k_{23} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{14} & k_{24} & k_{34} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{15} & k_{25} & k_{35} & k_{45} & k_{55} & k_{56} \\ k_{16} & k_{26} & k_{36} & k_{46} & k_{56} & k_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_z \\ \delta_y \\ \delta_x \\ \varphi_z \\ \varphi_y \\ \varphi_x \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_z \\ F_y \\ F_x \\ M_z \\ M_y \\ M_x \end{Bmatrix} \quad (2.8)$$

missä $k_{11} \dots k_{66}$ ovat paalun jäykkyysmatriisin alkiot, δ_z , δ_y ja δ_x ovat paalutuksen globaalien koordinaattiakselien suuntaiset siirtymäkomponentit, φ_z , φ_y ja φ_x ovat vastaavat kiertymäkomponentit, F_z , F_y ja F_x ovat paaluanturaan kohdistuvan ulkoisen kuormituksen voimakomponentit ja M_z , M_y ja M_x vastaavat momenttikomponentit. (Jutila et al 2014, s. 37, 42) Kuvassa 5 on esitetty paalun yläpään sijainti ja suuntakulmat paalutuksen globaalissa koordinaatistossa.



Kuva 5. Yksittäisen paalun sijainti ja suuntakulmat paalutuksen globaalisissa koordinaatistossa (Jutila A. & Syrjä R., 2012, s.216, muokattu)

Matriisiyhtälöstä (2.8) ratkaistujen paaluanturan tietyn tarkastelupisteen siirtymien jälkeen lasketaan paalukohtaiset rasitukset projisoimalla siirtymätila tarkasteltavan paalun yläpään globaaliin koordinaatistoon, jolloin paaluvoiman yhtälö (2.6) esitetään muodossa

$$N_i = k_i(p_{z,i}\delta_{z,i} + p_{y,i}\delta_{y,i} + p_{x,i}\delta_{x,i} + r_{z,i}\varphi_{z,i} + r_{y,i}\varphi_{y,i} + r_{x,i}\varphi_{x,i}) \quad (2.9)$$

missä paalun suuntakulmien kosineista käytetään merkintää p_i ja paalun momenttivarista merkintää r_i paalutuksen globaalien koordinaattiakselien suhteen kuvan 5 mukaisesti

$$\begin{aligned} p_{z,i} &= \cos(\alpha_i) \\ p_{y,i} &= \cos(\beta_i) \\ p_{x,i} &= \cos(\gamma_i) \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} r_{z,i} &= y_i p_{x,i} - x_i p_{y,i} \\ r_{y,i} &= x_i p_{z,i} - z_i p_{x,i} \\ r_{x,i} &= z_i p_{y,i} - y_i p_{z,i} \end{aligned} \quad (2.11)$$

missä x_i, y_i ja z_i ovat paalun yläpään sijainnit paalutuksen globaalissa koordinaatistossa. (Jutila et al, 2014, s.43, Jutila A. & Syrjä R., 2012, s.217)

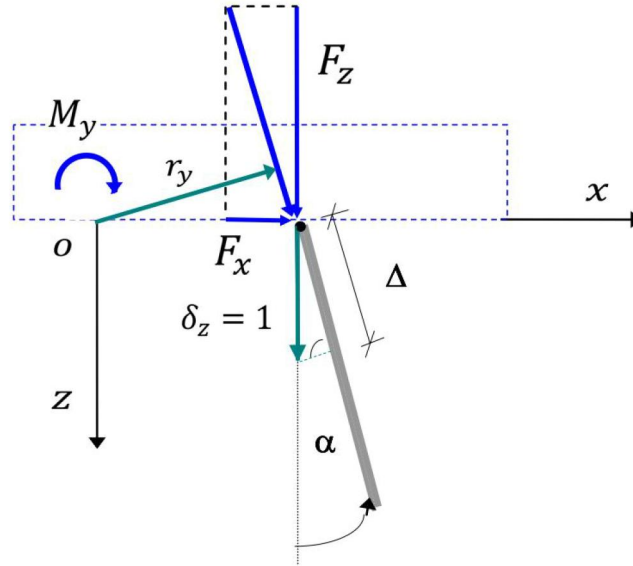
Universaalissa tilanteessa paaluperustuksella on kaikki kuusi vapausastetta matriisiyhtälön (2.8) mukaisesti. Todellisuudessa paalutukseen kohdistuu vain harvoin rasituksia kaikkien vapausasteiden suhteen, joten matriisiyhtälö sievenee tavanomaisissa paalutuksissa rajallisempaan muotoon. Esimerkiksi, kun paalutuksella on vähintään yksi symmetriataso, voidaan rakennetta käsitellä tasopaalutuksena. Tällöin paalutuksen yleinen matriisiyhtälö sievenee 2D-tasoa vastaavaksi matriisiyhtälöksi

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{12} & k_{22} & k_{23} \\ k_{13} & k_{23} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_z \\ \delta_x \\ \varphi_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_z \\ F_x \\ M_y \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$

missä paalutuksella on kahden akselin suuntaiset siirtymä- ja voimakomponentit sekä yhden akselin ympäri kiertymä- ja momenttikomponentti. (Jutila et al. 2014, s. 36-37)

Paalutuksen jäykkyysmatriisin alkiot voidaan ratkaista paalukohtaisesti asettamalla kunkin siirtymäkomponentin arvo vuorollaan yksikön suuruiseksi muiden vapausasteiden siirtymien ollessa arvoltaan nolla ja ratkaisemalla kyseisen siirtymätilan aikaansaamat voimakomponentit paalun yläpäässä. Koko paalutuksen jäykkyysmatriisi muodostetaan summaamalla kullekin paalulle erikseen määritetyt jäykkyysmatriisit yhteen. (Jutila et al 2014, s. 38, 42)

Määritetään tasopaalutusta vastaavat jäykkyysmatriisin alkioit yksittäiselle paalulle edellä esitetyllä periaatteella. Jäykkyysmatriisin symmetrisyyden seurauksena ratkaistavia alkioita on tasopaalutukselle kuusi kappaletta. Kuvassa 6 on esitetty jäykkyysmatriisin alkioiden ratkaisuperiaate kun, anturaa on poikkeutettu yksikön suuruisella pystysiirtymällä.



Kuva 6. Tasopaalutuksen yksittäisen paalun jäykkyysmatriisin ensimmäisen sarakkeen alkioiden määrittämisen periaate (Jutila et al, 2014, s.38, muokattu)

Asettamalla pystysiirtymän arvoksi $\delta_z = 1$ saadaan yhtälöstä (2.12) jäykkyysmatriisin ensimmäisen sarakkeen alkioille ratkaisut $k_{11} = F_z$, $k_{12} = F_x$ ja $k_{13} = M_y$. Vastaavasti asettamalla vaakasiirtymäksi $\delta_x = 1$ saadaan jäykkyysmatriisin toisen sarakkeen alkioille ratkaisut $k_{22} = F_x$ ja $k_{23} = M_y$, kun anturan muut siirtymäkomponentit ovat arvoltaan nolla. Merkittäessä paaluanturan kiertymää y-akselin ympäri $\varphi_y = 1$, saadaan jäykkyysmatriisin viimeisen alkion ratkaisuksi $k_{33} = M_y$.

Paalun yläpään siirtymä voidaan lausua poikkeutetun siirtymätilan projektiona paalun-suuntaiselle akselille, jolloin asettamalla $\delta_z = 1$ saadaan $\Delta(\delta_z) = \cos(\alpha)\delta_z = \cos(\alpha)$, sekä asettamalla $\delta_x = 1$ saadaan $\Delta(\delta_x) = \sin(\alpha)\delta_x = \sin(\alpha)$, ja vielä asettamalla $\varphi_y = 1$ saadaan $\Delta(\varphi_y) = \varphi_y r_y = r_y$, missä α on paalun akselin ja z-akselin välinen kulma.

Nyt jäykkyysmatriisin alkioit voidaan esittää yhtälön (2.6) mukaisen paaluvoiman z- ja x-akselien suuntaisten komponenttien sekä origon suhteen lasketun momentin avulla

$$\begin{aligned}
k_{11} &= F_z = N \cos(\alpha) = k \Delta(\delta_z) \cos(\alpha) = k \cos^2(\alpha) \\
k_{12} &= F_x = N \sin(\alpha) = k \Delta(\delta_z) \sin(\alpha) = k \cos(\alpha) \sin(\alpha) \\
k_{13} &= M_y = N r_y = k \Delta(\delta_z) r_y = k \cos(\alpha) r_y \\
k_{22} &= F_x = N \sin(\alpha) = k \Delta(\delta_x) \sin(\alpha) = k \sin^2(\alpha) \\
k_{23} &= M_y = N r_y = k \Delta(\delta_x) r_y = k \sin(\alpha) r_y \\
k_{33} &= M_y = N r_y = k \Delta(\varphi_y) r_y = k r_y^2
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Siirtymämenetelmään perustuva paaluvoimien ratkaisumalli on hyvin käyttökelpoinen hyperstaattisille paalutuksille. Paaluvoimien ratkaiseminen siirtymämenetelmällä noudattaa aina samaa alla esitettyä periaatetta paalutuksen monimuotoisuudesta riippumatta.

1. Valitaan paalutuksen koordinaatisto
2. Määritetään jäykkyyssmatriisin kertoimet
3. Redusoidaan ulkoiset kuormat valittuun origoon
4. Ratkaistaan paaluanturan siirtymäkomponentit yhtälöstä (2.8)
5. Määritetään paaluvoimat yhtälöstä (2.9)

(Jutla et al, 2014, s.40)

2.3 Paaluryhmän suunnittelu

Paalutuksen suunnittelun lähtökohtana on riittävän jäykkyyden saavuttaminen kaikkia perustusta kuormittavia rasituksia vastaan. Kun käytettävän paalutyypin kapasiteetti on tiedossa, voidaan tarvittavat paalumäärät arvioida alustavasti mitoittamalla suoraviivaisesti pystypaalut pystykuormituksille ja vinopaalut vaakakuormituksille sekä lisäämällä pystypaalujen määrää vielä momenttikuumitus huomioiden. (Jutla et al. 2014, s.48) Lisäksi on olennaista huomioida, että paalutuksessa eripuolilla sijaitsevat paalut saavat tyyppillisesti suurimman rasituksensa eri kuormitusyhdistelmästä, jolloin paalutusta rasittavien kuormien todenmukaisen arvioinnin merkitys korostuu. (Helenelund, 1980, s.104)

Paaluryhmän laskennan lähtökohtana on luonnollisesti saavuttaa tila, jossa yhdenkään paalun kapasiteettia ei ylitetä niin puristus- kuin vetorasitustenkaan suhteen. Tämä ei kuitenkaan yksinomaan ole riittävä tarkastelu rakenteellisesti toimivan paalutuksen määrittämiseksi, sillä paaluperustukseen muodostuva kokonaissiirtymä voi olla lopputuloksen kannalta haitallisen suuri, vaikka paalutuksen mitoittaminen paalujen kapasiteetin suhteen olisi hyväksyttävissä. Näin ollen paalutuksen suunnittelussa on olennaista varmistaa, ettei perustukseen muodostuvilla siirtymillä ole rungon rakenteellisen toiminnan kannalta merkittävän epäedullista vaikutusta.

2.3.1 Paalutuksen kiertokeskiö ja pääjäykkydet

Paalutuksen suunnittelun kannalta on oleellista tuntea sen pääjäykkyysuunta, sillä luonnollisesti paalutuksen kuormankantokyky on tässä suunnassa kaikkein suurin. Kiertokeskiö merkitsee tasopaalutuksen pistettä, jossa voima- ja momenttiyhtälöt ovat toisistaan riippumattomia. Toisin sanoen ulkoinen kiertokeskiöön redusoitu momentti aiheuttaa paalutukselle ainoastaan kiertymän kiertokeskiön ympäri ja vastaavasti kiertokeskiön kautta kulkeva voimaresultantti aiheuttaa paalutukselle yhdensuuntaissiirtymän, jolloin kiertymää ei pääse tapahtumaan. Mikäli tasopaalutus koostuu pelkästään kahden suuntaisista paaluriveistä, voidaan kiertokeskiö määrittää yksinkertaisesti paaluryhmien painopisteakselien leikkauspisteenä. Stabiililla tasopaalutuksella on aina yksikäsitteinen kiertokeskiö. Avaruuspaalutuksilla sen sijaan ei ole yksikäsitteistä kiertokeskiötä muuten kuin erikoistapauksissa. (Jutla et al, 2014, s.40, 43)

Kiertokeskiö määritetään tasopaalutukselle ehdoista $\sum k \cos(\alpha) r_y = 0$ ja $\sum k \sin(\alpha) r_y = 0$, jolloin kiertokeskiön koordinaatit saadaan yhtälöistä

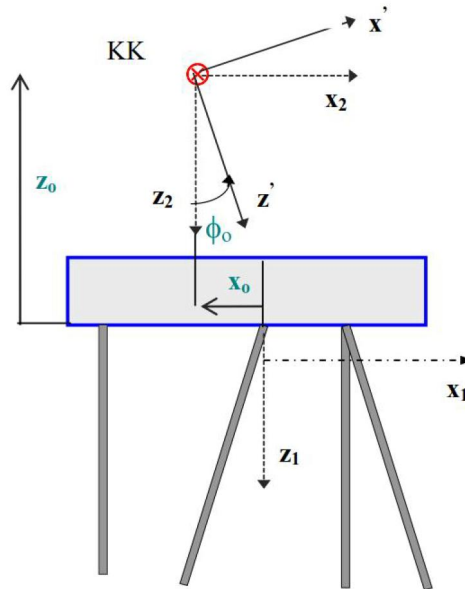
$$z_0 = -\frac{\begin{vmatrix} k_{11} & k_{13} \\ k_{12} & k_{23} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{12} & k_{22} \end{vmatrix}} = -\frac{k_{11}k_{23} - k_{12}k_{13}}{k_{11}k_{22} - k_{12}^2} \quad (2.14)$$

$$x_0 = -\frac{\begin{vmatrix} k_{12} & k_{13} \\ k_{22} & k_{23} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{12} & k_{22} \end{vmatrix}} = -\frac{k_{12}k_{23} - k_{22}k_{13}}{k_{11}k_{22} - k_{12}^2} \quad (2.15)$$

Tasopaalutuksen pääjäykkyysuunta määritetään ehdosta $\sum k \cos(\alpha) \sin(\alpha) = 0$, jolloin pääjäykkyys suunnan kulma ϕ_0 suhteessa paalutuksen koordinaatistoon kuvan 7 mukaisesti saadaan yhtälöstä

$$\tan(2\phi_0) = \frac{2k_{12}}{k_{11} - k_{22}} \quad (2.16)$$

(Jutla et al, 2014, s. 41)



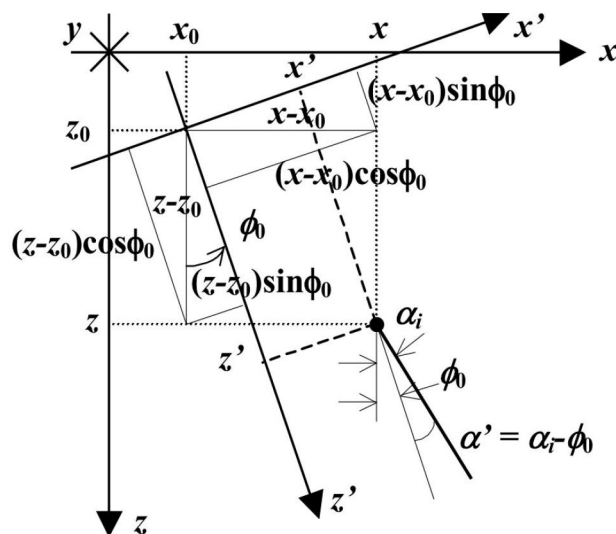
Kuva 7. Paalutuksen kiertokeskiö ja pääjäykkyys-suunta (Jutila A. et al, 2014, s.40, muokattu)

Kun paalutuksen kiertokeskiön sijainti ja pääjäykkyys-akselin suunta tunnetaan, voidaan paalutuksen jäykkyysmatriisi muodostaa pääjäykkyys-suunnassa. Paalun yläpään sijainti ja suuntakulma pääjäykkyys-koordinaatistossa saadaan kuvan 8 mukaisesti

$$z'_i = (x_i - x_0) \sin(\phi_0) + (z_i - z_0) \cos(\phi_0)$$

$$x'_i = (x_i - x_0) \cos(\phi_0) - (z_i - z_0) \sin(\phi_0) \quad (2.17)$$

$$\alpha'_i = \alpha_i - \phi_0$$



Kuva 8. Paalun sijainti ja suuntakulmat paalutuksen pääjäykkyys-koordinaatistossa (Jutila A. & Syrjä R., 2012, s.199, muokattu)

Muodostamalla paalutuksen jäykkyysmatriisi pääjäykkyys-koordinaatistossa nollautuu matriisin muut alkiot paitsi lävistäjällä sijaitsevat toisistaan riippumattomat tekijät, jolloin tasopaalutuksen matriisiyhtälö esitetään muodossa

$$\begin{bmatrix} K'_{11} & 0 & 0 \\ 0 & K'_{22} & 0 \\ 0 & 0 & K'_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta'_z \\ \delta'_x \\ \varphi'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F'_z \\ F'_x \\ M_y \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

Matriisin lävistäjällä sijaitsevia termejä kutsutaan paalutuksen pääjäykkyyksiksi. (Jutila et al, 2014, s.40) Kappaleen 2.2.3 mukaan paalutuksen pääjäykkyydet ratkaistaan summamalla jokaisen paalun kiertokeskiön suhteen lasketut jäykkyysalkiot, jolloin koko paalutuksen pääjäykkyydet esitetään muodossa $K'_{11} = \sum kp'_x{}^2$, $K'_{22} = \sum kp'_z{}^2$ ja $K'_{33} = \sum kr'_y{}^2$.

2.3.2 Paalujen sijoittelu

Paalujen sijainti määritellään siten, että paalutuksen pääjäykkyyssuunta vastaa mahdollisimman hyvin mitoittavien kuormitusresultanttien suuntaa. Momentin vaikutus minimoidaan suunnittelemalla paalutuksen kiertokeskiö mahdollisimman lähelle pysyvän kuorman kuormitusresultanttia. Tällöin paaluperustuksen kiertymä saadaan pidettyä mahdollisimman pienenä ja paalutukselle muodostuu tasainen puristusrasitus. (RIL-166, 1986 s.194, Jutila et al. 2014, s.48)

Tukipaalutus suunnitellaan tavallisesti siten, että jokainen ryhmän paalu on puristettu kunkin kuormitusyhdistelmän rasituksille. (Jutila et al. 2014, s.48) Vetorasitettuja paaluja pyritään lähtökohtaisesti välttämään. Yleensä paalulle ei voida sallia sen omaa painoa suurempaa vetorasitusta. (Rantamäki & Tammirinne, 2002, s. 59)

Paalujen asennuksessa tapahtuvien suuntavirheiden vuoksi paalut saattavat ajautua maassa suunniteltua lähemmäs toisiaan. Lyömällä asennettavat paalut myös syrjäyttävät maata, jonka seurauksena paalua ympäröivä maa tiivistyy, joka puolestaan voi haitata viereisten paalujen tunkeutumista tavoitetasoon. Näiden tekijöiden vuoksi paalujen sijaintien suunnittelussa tulee huomioida paalutusohjeissa määritelty minimikeskiöetäisyydet. (Jääskeläinen, 2003, s.56) Taulukossa 1 on esitetty RIL 254-2-2016 mukaiset paalujen keskiöetäisyyksien vähimmäisarvot yhdensuuntaisille pien- ja teräsbetonipaaluille, jossa d on paalun halkaisija tai sivumitta. Lisäksi RIL 254-2-2016 mukaan tukipaalujen välinen keskiöetäisyys ei saa alittaa 0,8 metriä.

Taulukko 1. Tukipaalujen keskiöetäisyyden vähimmäisarvot (RIL 254-2-2016, s. 179, muokattu)

Paalun pituus [m]	Tukipaalu	
	Pyöreä	Neliömäinen
10	2,7d	3d
10-25	Väliarvot interpoloidaan	
25	3,5d	4d

Risteävien paalujen väliset vähimmäisetäisyydet määräytyvät maakerrosten rakenteen sekä risteämissyvyyden perusteella. Lähellä maanpintaa risteävillä tukipaaluilla riittävänä etäisyytenä pidetään paalun halkaisijan suuruista vapaata väliä hienorakeisissa maakerroksissa, mikäli paalun asentaminen on mahdollista sen osumatta viereisiin paaluihin. Karkearakeisissa maakerroksissa paalujen vapaa väli tulee olla selvästi suurempi huomioiden maan syrjäytymisen ja tiivistymisen vaikutus viereisiin paaluihin ja asennustyöhön. (RIL 254-2-2016, s.179-180) Lyöntipaalutusohjeen (LPO-87, 1991, s.51) mukaan paalujen välinen keskiöetäisyys tulee olla 5 metrin syvyydellä sijaitsevassa paalujen risteyskohdassa vähintään kaksi kertaa paalun halkaisijan suuruinen sekä 10 metrin syvyydessä vähintään taulukon 1 arvojen suuruinen.

Paaluryhmän reunimmaisten paalujen sijainti suunnitellaan siten, että antura kestää paaluvoimista syntyvät jännitykset. Paalujen reunaetäisyys tulee olla riittävä paaluvoimien aiheuttamien vetovoimien ankkuroimiseksi. Paalujen riittävällä reunaetäisyydellä varmistetaan myös, ettei paaluanturan reuna pääse lohkeamaan. (RIL 254-2-2016, s.180, RIL 202-2011/by 61, s.79)

Teräsbetonipaaluilla keskiöetäisyys tulisi olla anturan reunasta vähintään paalun sivumitan suuruinen. Putkipaaluilla sekä ympyrän muotoisilla paalupoikkileikkauksilla paalun ulkopinnan tai paaluhatun reunan etäisyys anturan reunasta tulisi olla vähintään puolet paalun halkaisijasta tai paaluhatun sivumitasta. (RIL 254-2-2016, s.180)

2.3.3 Vinopaalut

Merkittävien vaakasuuntaisten kuormitusten kohdistuessa paaluperustukseen on vinopaalujen käyttö välttämätöntä, sillä tavanomaisesti tukipaalut on suunniteltu vastaanottamaan ainoastaan paalun suuntaisia kuormituksia. (Jääskeläinen, 2003, s.57)

Paalujen mahdolliset kaltevuudet määräytyvät yleensä käytettävän paalutuskaluston rakenteen ja stabiliteetin perusteella. Vinopaalujen suunnittelussa tulee huomioida myös paalujen asennusjärjestys sekä paalutusalustan kantavuus. (RIL 254-2-2016, s.181, Pöhlänen, 2015) Vinopaalujen törmäämisvaaraan tulee kiinnittää erityisesti huomiota silloin,

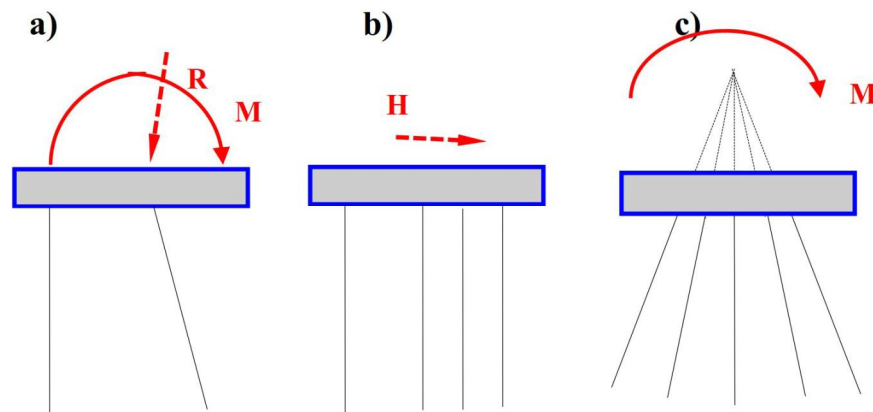
mikäli taso, jolta paalutustyö suoritetaan, sijaitsee korkeammalla kuin paalujen suunniteltu katkaisutaso. Tällöin, vaikka paalujen törmäämiseltä välttyttäisiin perustamistasossa, voi paalutustyön suoritustasossa vinopaalujen linjat ristetä.

Paalujen kaltevuutta 4:1 (14°) pidetään yleisesti saavutettavana. Loivempaa kaltevuutta kuin 3:1 (18°) tulisi kuitenkin välttää. (Rantamäki & Tammirinne, 2002, s. 77) Näin ollen vaakakuormien rasittama paalutus vaatii myös riittävää pystykuormaa, jotta kuormituksen resultantti pysyy vinopaalujen kaltevuuksia vastaavana. (Jääskeläinen, 2003, s.57)

Vinopaalujen suunnittelussa tulee huomioida painuvan maapohjan aiheuttama poikittaiskuormitus. Myös mahdolliset täytöt perustusten vierellä voivat aiheuttaa ylimääräistä taivutusrasitusta vinopaaluille. (RIL 207-2017, s.122, RIL 254-2-2016, s.181)

2.3.4 Stabiili paaluryhmä

Paaluryhmän suunnittelussa tulee varmistaa, että paalutuksella on jäykkyyttä jokaisen siihen kohdistuvan kuormituksen suhteen. Käsiteltäessä paaluja nivelellisesti päistään tuettuina sauvoina, nähdään selvästi kuvan 9 esittämien tasopaalutusten olevan epästabiileja.



Kuva 9. Epästabiileja tasopaalutuksia (Jutila et al 2014, s.34, muokattu)

Kuvan 9 perusteella pysty-, vaaka- ja momenttirasituksen kuormittaman tasopaalutuksen voidaan todeta olevan epästabiili, jos paalurivejä on vähemmän kuin kolme (tapaus a) tai jos paalutus koostuu vain pystysuorista paaluista (tapaus b). (Jutila et al 2014, s.34) Vиноja paaluja käytettäessä tulee kiinnittää huomiota siihen, ettei kaikkien paalujen keskilinjojen jatkeet leikkaa toisiaan samassa pisteessä, koska tällöin paaluryhmä ei pysty vastaanottamaan momenttirasitusta. Kuvan 9 tapauksen c paalutus on stabiili ainoastaan siinä erikoistapauksessa, että kuormaresultantin vaikutusviiva kulkee myös tämän saman pisteen kautta. (Helenelund, 1980, s.103-104)

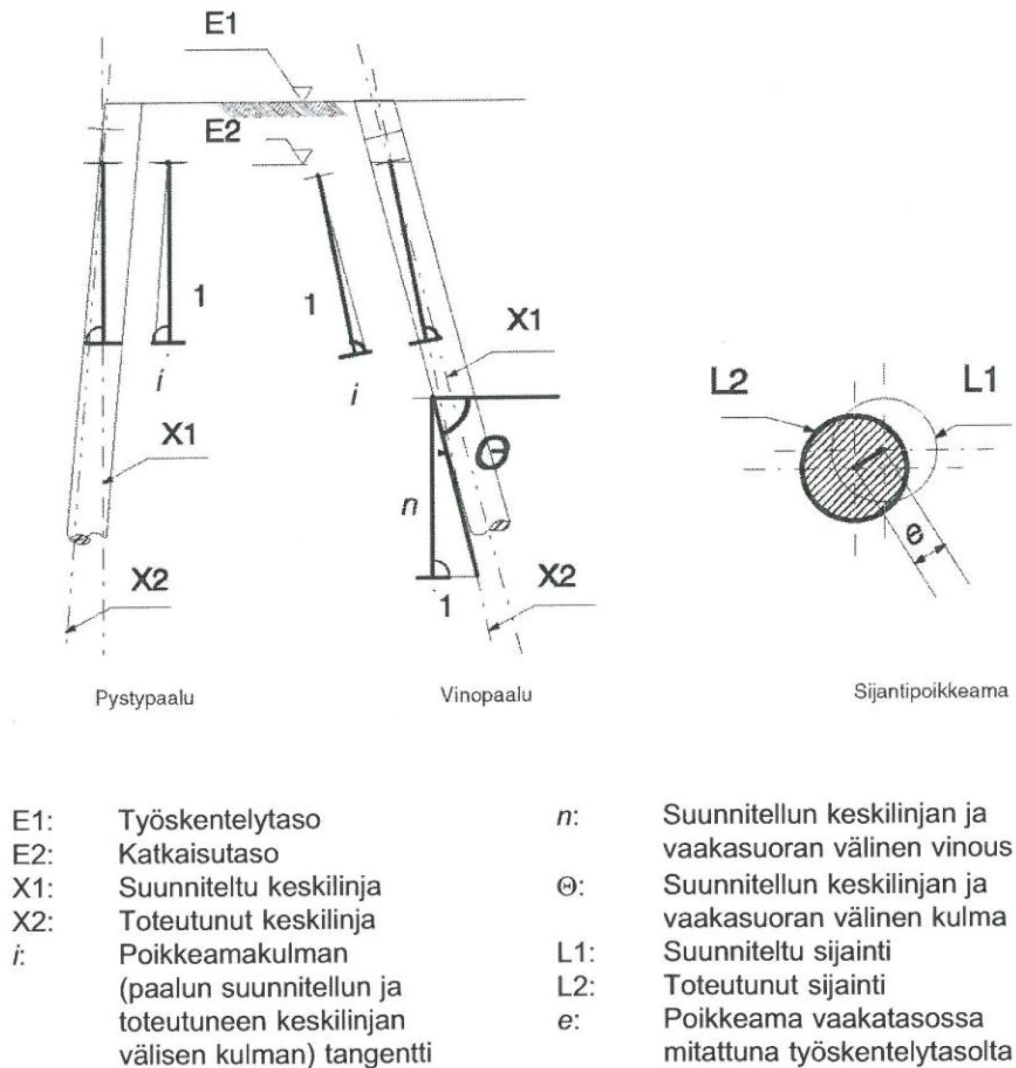
Kuvassa 9 esitetyjä epästabiileja paalutuksia on mahdollista käyttää ainoastaan siinä tapauksessa, että epästabiiliuuden aiheuttava kuormakomponentti on merkityksettömän

pieni tai sen siirtäminen maapohjaan voidaan muulla tavoin osoittaa (Jutila et al 2014, s.34) Esimerkiksi pystysuorista paaluista koostuvalla paalutuksella voidaan hetkellisistä kuormituksista, kuten tuulikuormista, aiheutuvat vaakavoimat vastaanottaa osittain tai kokonaan passiivisella maanpaineella, jos paaluantura on maan sisässä ja paaluja ympäröi kiinteä maa-aines. (Helenelund, 1980, s.103, Tomlinson & Woodward, 2008, pp. 307)

2.3.5 Sijainti- ja mittapoikkeamat

Paaluperustusten suunnittelussa keskeisessä asemassa on paalujen asentamisessa syntyvän sijaintipoikkeamien huomioiminen. Pohjaolosuhteiden ja mittaepätarkkuuksien seurauksena paalujen lopullinen sijainti saattaa poiketa suunnitellusta. Myös paalutyypin valinnalla on vaikutusta paalun lopulliseen sijaintiin. Esimerkiksi kivilohkareiseen maaperään asennettavilla lyöntipaaluilla sijaintipoikkeamat ovat tyypillisesti suuremmat kuin poraamalla asennettavilla paaluilla.

RIL-254-2-2016 mukaan lyömällä asennettavilla teräsbetonipaaluilla sekä pienpaaluilla yksittäinen pysty- tai vinopaalu, paalulaatta tai paaluhatturakenne saa poiketa katkaisutasosta mitattuna enintään $e_{max} = 0,10\text{ m}$. Paaluryhmillä sijaintitoleranssit määritellään erikseen yksittäiselle paalulle sekä koko ryhmän painopisteelle. 2-8 paalun ryhmässä yksittäinen paalu saa poiketa $e_{max} = 0,15\text{ m}$ ja näitä suuremmilla paaluryhmillä $e_{max} = 0,2\text{ m}$. Paaluryhmän painopisteen poikkeaman toleranssi on asetettu ryhmän koosta riippumatta $e_{max} = 0,05\text{ m}$ suuruiseksi. Yksittäinen pysty- tai vinopaalun kaltevuus saa poiketa enintään $i_{max} = 0,04\text{ (}0,04\text{ m/m)}$ ja samansuuntaisten paalujen ryhmässä $i_{max} = 0,02\text{ (}0,02\text{ m/m)}$. Lisäksi kaltevien paalujen projektio vaakatasossa saa poiketa korkeintaan 2° ($i = 0,035\text{ m/m}$) suunnitelmien mukaisesta suunnasta. Kuvassa 10 on esitetty paalutuksessa tarkasteltavat geometrinen rakentamistoleranssin määritelmät.



Kuva 10. Paalun sijaintitoleranssit (RIL-254-2-2016, s.182)

Suunnitteluvaiheessa käytettävien paalujen pituuksien arviointi on suhteellisen vaikeaa. Erityisesti paksuun ja lohkareiseen pohjamoreenikerrokseen tunkeutuvissa paaluissa todellisten pituuksien arviointi on haastavaa. Näin ollen paalutuksen suunnittelussa onkin hyvä varautua kohtalaisiin ylipituuksiin, varsinkin haastavissa pohjaolosuhteissa. Tuki-paalut, joiden kantavuus määritellään kantavuuskaavoista, lyödään tiettyä lyöntivastusta vastaavaan syvyyteen, jolloin todelliset paalupituudet selviävät vasta paalujen asennus-työn aikana. (Rantamäki & Tammirinne, 2002, s.76)

2.4 Paaluantura

Paaluanturan tehtävä on jakaa kuorma yläpuoliselta rakenteelta paaluille. Vaikka paaluanturat ovat hyvin yleisiä rakenteita, ei suunnittelustandardeissa esitetä juurikaan niiden rakenteellista toimintaa käsitteleviä yleispäteviä ohjeistuksia. Näin ollen käytännön suunnittelussa paaluanturoiden mitoittamiseen sisältyykin paljon suunnittelijoiden empiirisiä sääntöjä. (Abdul-Razzaq & Farhood, 2017)

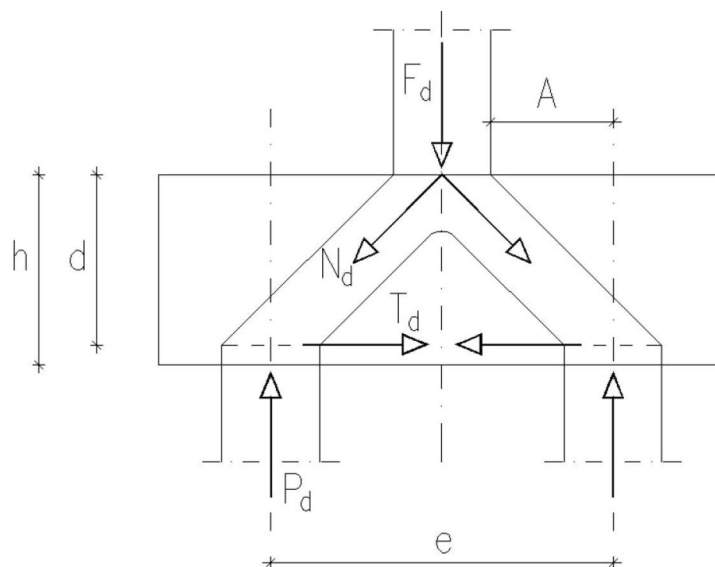
Teräsbetonirakenteet voidaan rakenteellisen toiminnan mukaan jakaa B-alueisiin (beam tai Bernoulli) ja D-alueisiin (discontinuity, disturbance tai detail). (Schlaich et al, 1987) B-alueissa jännitys jakauma on Bernoullin hypoteesin mukainen, jolloin mitoitus voidaan suorittaa palkkiteoriaan perustuen. Paaluanturoita käsitellään tavallisesti D-alueen tavoin toimivana teräsbetonirakenteena. D-alueissa jännitys jakauma on merkittävästi epälineaarinen, jolloin poikkileikkauksen mitoitus ei voi perustua yleiseen palkkiteoriaan. D-alueiden mitoittamista varten onkin kehitetty ns. ristikkomenetelmä (Folić et al, 2018)

Tässä luvussa esitellään paaluanturan mitoittamisen ja suunnittelun yleisiä periaatteita. Luvussa käsitellään myös paaluanturan joustavuuden vaikutusta paalutuksen suunnittelussa.

2.4.1 Mitoituksen periaatteet

Paaluantura voidaan mitoittaa SFS-EN 1992-1-1 (2015, jatkossa EC2) kohdassa 5.6.4 esitetyllä ristikkomenetelmällä tai taivutukseen perustuvilla menetelmillä, jolloin anturan kestävyys tulee tarkastella myös leikkauksen sekä pilarin ja paalujen lävistymisen osalta. (Silvennoinen et al, 2011, s.7, Laitakari, s.4) Paaluanturan taivutukseen perustuvat menetelmät tulevat kyseeseen etenkin paalutuksien yhteydessä, joissa paalujen väliset etäisyydet ovat suuria.

Ristikkoanalogian perusteella mitoittaessa paaluanturan alapintaan paalujen välille sijoitettava raudoitus toimii ristikkomallin vetosauvana ja puristusrasitukset hallitaan vinoilla betonisauvoilla. (Abdul-Razzaq & Farhood, 2017) Kuvassa 11 on esitetty paaluanturan ristikkoanalogian peruseriaate 2D-tasossa.



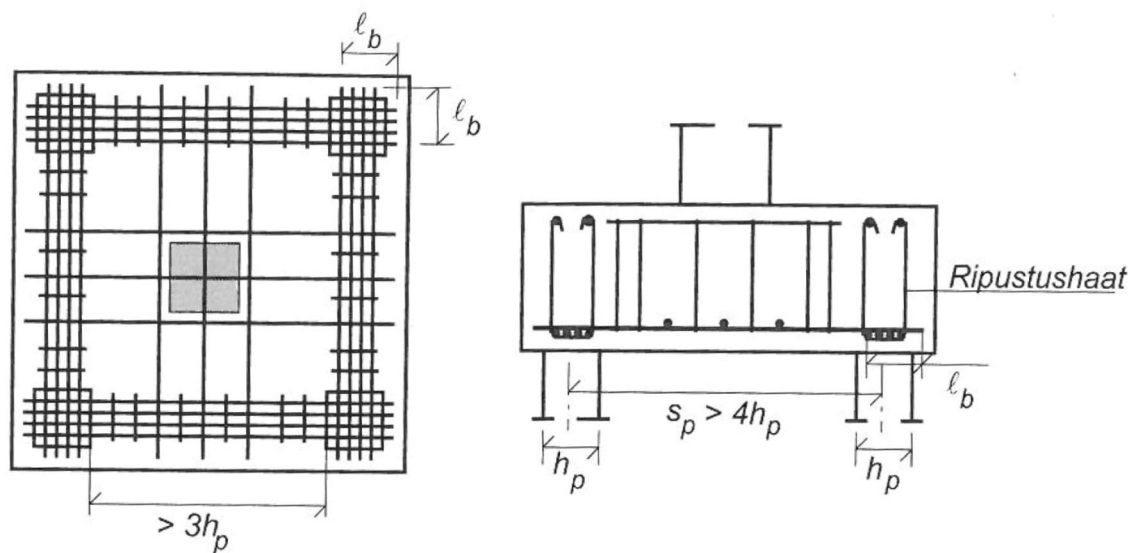
Kuva 11. Paaluanturan ristikkomalli. (Betoniteollisuus ry, Eurokoodin ja PO-2011 mukaiset vakiopaaluanturat, 2012, s.6)

Paaluanturoiden korkeus valitaan tavallisesti paalujen keskiöväliin verrattuna niin suureksi, että voimasuureiden määrittelyyn voidaan käyttää ristikkoanalogiaa. Joka tapauksessa anturan korkeus tulee mitoittaa siten, ettei läpileikkautumista pääse tapahtumaan. (Leskelä, 2008, s.454) Leikkausraudoitetulle paaluanturalle EC2 määrittää ristikkoanalogiassa käytettävän puristus- ja vetosauvojen välisen kulman θ suuruudeksi vähintään $21,8^\circ$ pilarin ja paalun mukaisesta vaakatasosta mitattuna. (Bond et al, 2006, s.48, EC2, s.87) Kuitenkaan 30° pienempiä kulman θ arvoa ei tulisi käyttää niiden ollessa epärealistisia ja koska niihin liittyy myös muodonmuutosten yhteensopimattomuuksia. (fib Bulletin vol. 3, 1999, pp.148) Mikäli paaluantura mitoitetaan käyttäen kulman θ arvona vähintään 45° ei leikkausraudoitukselle ole tarvetta. (Laitakari, s.5)

Reynolds & Steedman (1988) ovat esittäneet suosituksen, jossa paaluanturan paksuus määräytyy käytetyn paalun halkaisijan perusteella. Mikäli paalun halkaisija on pienempi tai yhtä suuri kuin 550mm, on paaluanturan suosituspaksuus $2h_p + 100$ ja jos paalun halkaisija on suurempi kuin 550mm on suositeltava paaluanturan paksuus $1/3(8h_p - 600)$, missä h_p on paalun halkaisija. Lisäksi paaluanturan paksuuden tulee tämän ohjeistuksen mukaan olla riittävä myös raudoituksen ankkuroitumisvaatimuksille, sekä paaluanturan leikkaus- ja lävistyskestävyydelle.

Paaluanturan sivumitat määräytyvät niin paalutusohjeen määrittämien reuna- ja keskiöetäisyyksien sekä sijaintipoikkeamien, kuin myös pääterästen ankkuroitumisvaatimusten mukaan. (Laitakari, s.14) Ristikkomenetelmää käytettäessä on huomioitava, että vetosauvoina toimivat pääteräkset ankkuroidaan täydelle voimalle. (Bond et al, 2006, s.48) Pääraudoitus sijoitetaan kaistoina paalujen päiden välille ja mikäli paalujen keskiöetäisyys on enemmän kuin neljä kertaa paalun halkaisija, raudoitetaan myös paalujen väliin

jäävät alueet. Kuormien siirtymisen varmistamiseksi paaluanturan kaistaraudoitteiden yhteydessä käytetään myös ripustusraudoitusta kuvan 12 mukaisesti. Pääterästen ankkuroitumisen katsotaan alkavan reunimmaisen paalun ylittävstä sisimmäisestä kaistaraudoitteesta kuvassa 12 esitetysti. (Leskelä, 2008, s.456-457)



Kuva 12. Paaluanturan vetorausdoituksen ankkurointi sekä ripustusraudoituksen sijointus. (Leskelä, 2008, s.457)

Paaluanturan mitoittaminen käyttörajatilassa esimerkiksi teräsännitysten ja halkeamaleveyden suhteen voidaan suorittaa myös ristikkomenetelmää käyttäen, mikäli menetelmän edellyttämien sauvavoimien yhteensopivuus säilyy. Tällöin erityisesti puristussauvojen suunta ja sijainti on asetettava lineaarisen kimmoteorian mukaisesti. (EC2, s.63) Käyttörajatilassa paaluanturan mitoittaminen myös taipuman suhteen voi tulla kyseeseen, joskaan anturaperustuksille ei ole asetettu taipumarajoja. (by211, osa 2, s.182)

Tavanomaisissa kohteissa paaluperustusten suunnittelun ja toteuttamisen yksinkertaistamiseksi on kehitetty vakiopaaluanturoita. Vakiopaaluanturoiden mitat ja raudoitukset ovat valmiiksi määriteltäviä tiettyjen reunaehtojen puitteissa. (by 30-2, 1988, s.31) Vakio-paaluantura-ohjeet on julkaistu sekä teräsputki-, että teräsbetonipaaluin perustettuja anturoita varten. Teräsbetonipaaluja vakio-paaluanturoita on julkaistu 2 – 9 paalun anturoille ja teräsputkipaaluille vastaavasti 2 – 5 paalun anturoille. Vakio-paaluanturoita käytettäessä huomioitavaa on muun muassa se, ettei paaluille sallita vetorasituksia. Vakio-paaluanturoita ei myöskään ole suunniteltu vastaan ottamaan vaakakuormituksia, jolloin vakio-paaluryhmät muodostuvat pelkästään pystysuorista paaluista. (Eurokoodin ja PO-2011 mukaiset Vakio-paaluanturat, Betoniteollisuus ry, 2012 ja Perustukset, Teräsbetoniset vakio-paaluanturat RR- ja RD-paaluille, SSAB)

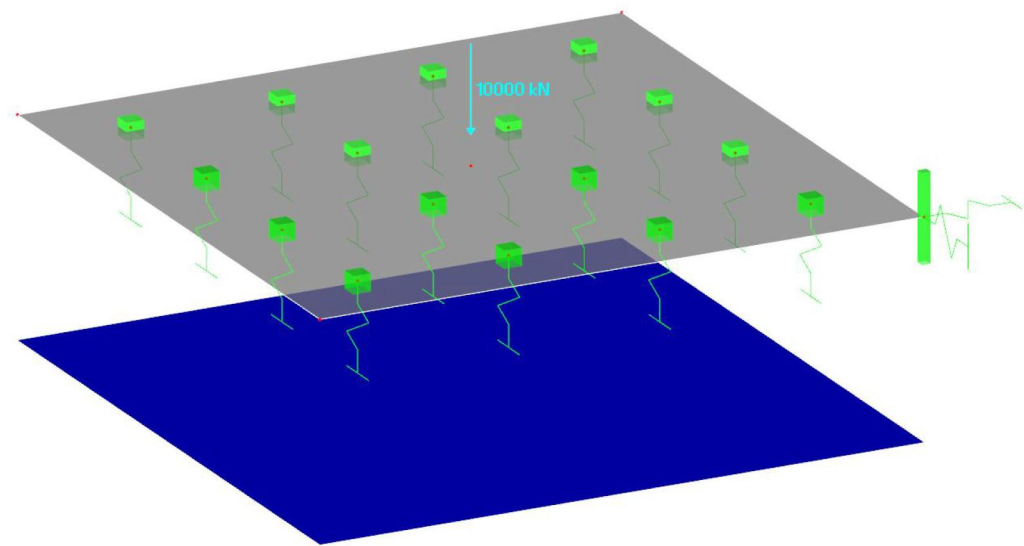
2.4.2 Jäykkä vai joustava paaluantura

Paaluperustuksen suunnittelun kannalta merkittävä alkuolettaamus liittyy paaluanturan jäykkyyden mallintamiseen. Paaluanturaa voidaan käsitellä täysin jäykkänä tai taipuisana kappaleena. Oletettaessa paaluantura äärettömän jäykäksi, saadaan paaluvoimat ratkaistua suoraan verrannollisesti jäykän kappaleen siirtymätilasta. Mikäli paaluanturan taipuisuus otetaan huomioon, vaikuttaa siihen syntyvät sisäiset muodonmuutokset olennaisesti paaluille tuleviin rasituksiin. (Design of Pile Foundations, US Army Corps of Engineers, 1991, pp. 4-30)

Havainnollistetaan paaluanturan jäykkyyden vaikutusta paaluvoimille yksinkertaisella 16 paalun esimerkillä. Paaluryhmää kuormittaa 10 MN suuruinen anturaan nähden keskeinen pystykuorma. Laskentavertailu suoritetaan RFEM-laskentaohjelmalla. Käytetään tarkastellussa esimerkissä paalutyypinä teräsbetonipaaluja RTB-300-16, joiden betonin lujuusluokkana käytetään C40/50, jolloin kimmokertoimen ominaisarvo $E_{cm} = 35,22$ GPa. Tarkastelu suoritetaan lyhytaikaiselle tilanteelle, jolloin viruman vaikutusta ei huomioida paalujen kimmokertoimen arvossa. Paalut mallinnetaan aksiaali jäykkyyttään vastaavina jousina. Paalujen pituutena käytetään tarkastellussa tilanteessa 15 m, jolloin paalujen jäykkyyttä vastaava jousivakio on 211320 kN/m. Ryhmän paalut ovat jäykkyydeltään yhteneväisiä, jolloin paalujen suhteelliset jäykkyydet eivät vaikuta rasitusjakumaan. Anturan ulkomitat ovat 4m ja paalut sijoitetaan 1 m x 1 m ruudukkoon. Anturan betonin lujuusluokkana käytetään tarkastellussa tilanteessa C35/45. Laatan elementtiverkotuksena käytetään RFEM-ohjelman asettamaa vakiojakoa.

Yleisesti ottaen teräsbetonirakenteen taivutusjäykkyys pienenee halkeilun seurauksena. Tässä esimerkissä tarkastellun paaluanturan jäykkyydessä ei kuitenkaan huomioida halkeilun vaikutusta, vaan paaluanturaa käsitellään yksinkertaistetusti tasajäykkänä betonilaattana.

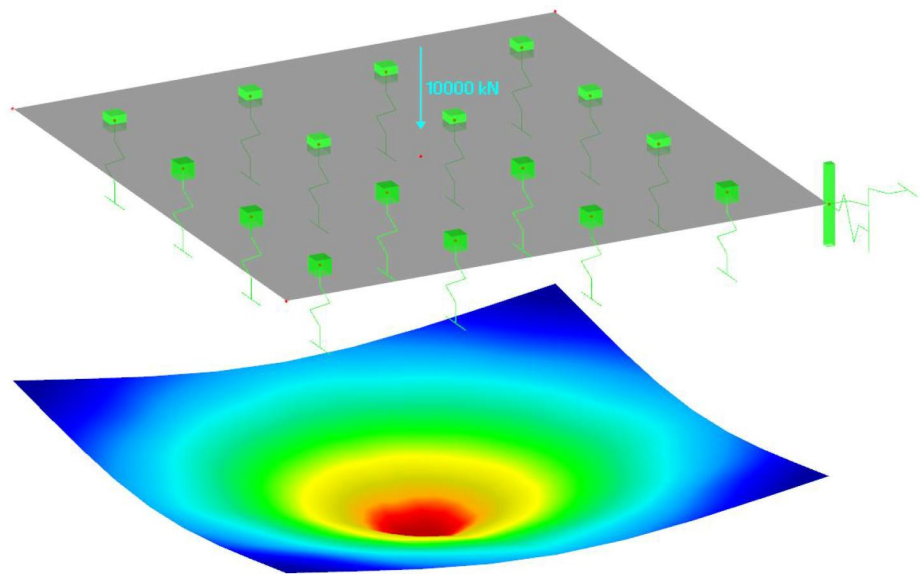
Paaluanturan taivutusjäykkyyden ollessa verrannollinen sen korkeuteen, tehdään täysin jäykkä paaluantura keinotekoisesti mallintamalla sen korkeus niin suureksi kuin RFEM-ohjelman puitteissa on mahdollista (100 m). Taipuisana käsiteltävän paaluanturan korkeudeksi mallinnetaan vastaavasti 1m, jolloin mallinnustapojen eroavaisuudet saadaan kärjistetyksi selville. Kuvassa 13 on esitetty erittäin jäykän paaluanturan muodonmuutos-tila sekä vastaavat paaluvoimat on esitetty kuvassa 14. Kuvissa 15 ja 16 on vastaavasti esitetty muodonmuutokset ja paaluvoimat taipuisana mallinnetulle paaluanturalle.



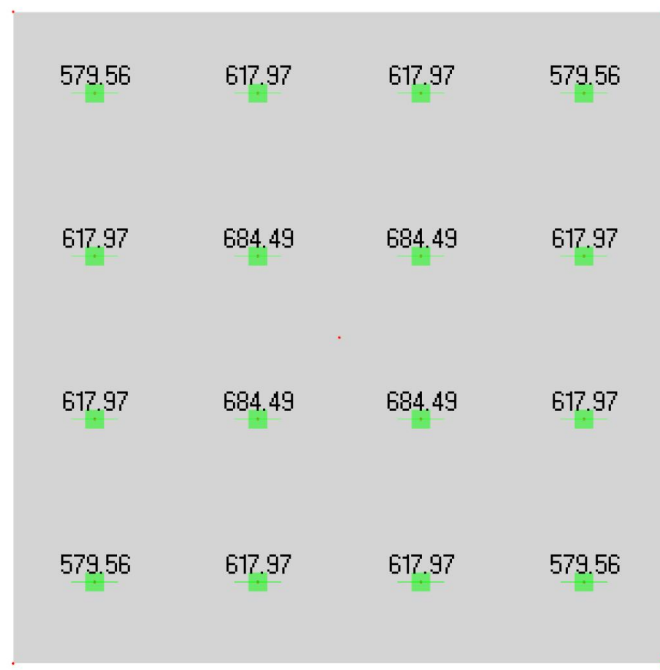
Kuva 13. Jäykän paaluanturan muodonmuutos keskeiselle pystykuormalle.



Kuva 14. Jäykän paaluanturan paaluvoimat [kN] keskeiselle pystykuormalle.



Kuva 15. Taipuisan paaluanturan muodonmuutos keskeiselle pystykuormalle.



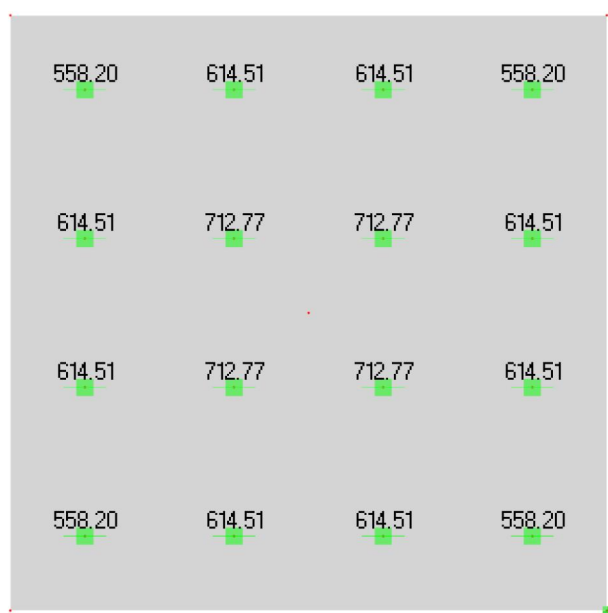
Kuva 16. Taipuisan paaluanturan paaluvoimat [kN] keskeiselle pystykuormalle.

Kuvien 13 ja 14 perusteella havaitaan, kuinka erittäin jäykkänä mallinnettu paaluantura säilyttää muotonsa kuormituksessa tasona ja aikaansaa paaluihin käytännössä identtiset rasitukset. Sen sijaan kuvien 15 ja 16 mukaiseen taipuisana laattana mallinnettuun paaluanturaan syntyy selvä taipumamuoto ja kuormituspisteen alaisiin paaluihin muodostuu n.

18% suurempi rasitus kuin nurkka-alueiden paaluille. Lisäksi taipuisan paaluanturan mallissa rasitetuimpien paalujen kuorma on n. 9% suurempi kuin paalujen rasitukset jäykän anturan tapauksessa. Taipuisalla anturalla taivutusjäykkyyden pieneneminen halkeilun seurauksena aiheuttaa todellisuudessa vielä suuremman eron muodostuville paalukuormille, sillä pienemmän jäykkyyden omaava antura ei pysty siirtämään kuormaa yhtä tehokkaasti reuna-alueiden paaluille, jolloin kuormituspisteen alaisille paaluille muodostuu suurempi rasitus. Toisaalta, vaikka paaluanturan oletettaisiin toimivan taipuisan laatan tavoin, on paaluanturan todellinen toiminta tyypillisesti jäykempi, sillä paaluanturoiden korkeuden suhde paalujen väliseen etäisyyteen on tavallisesti niin suuri, ettei rasitusten jakautuminen tapahdu anturan taivutuksen kautta, jolloin anturan sisäisten rasitusten jakautumista voidaan tarkastella esimerkiksi ristikkomenetelmän perusteella.

Paalujen jäykkyyden vaikutus

Paalujen jäykkyydellä on muodostuvien kuormitusten kannalta suuri merkitys. Mitä jäykempiä paalut ovat, sitä selvemmin taipuisan anturan vaikutus muodostuviin paalukuormiin tulee ilmi. Mikäli tarkastellussa tapauksessa käytetään 15 m paalujen sijaan 10 m pituisia paaluja on paalujen aksiaalijäykkyys 316980 kN/m. Tällöin muodostuvat paalukuormat 1m paksuisen anturan tapauksessa ovat kuvan 17 mukaiset.



Kuva 17. Taipuisan paaluanturan paaluvoimat [kN] keskeiselle pystykuormalle, kun paalujen jäykkyyttä kasvatetaan.

Kuvan 17 paalukuormien perusteella havaitaan, että paalujen ollessa jäykempiä aikaisempaan esimerkkiin verraten, on anturan keskialueen paalujen rasitus n. 28% suurempi kuin nurkassa sijaitsevilla paaluilla. Tämä on seurausta paaluanturan pienemmästä muodonmuutoksesta tarkasteltaessa jäykempiä paaluja. Jäykemmät paalut eivät painu anturan

keskialueella kasaan niin paljon kuin edellisessä 15m pitkien paalujen tarkastelussa, jolloin keskialueen paalut keräävät suuremman kuorman ja antura ei pysty jakamaan kuormaa yhtä merkittävästi reuna-alueen paaluille.

Jäykän paaluanturan paksuuden määrittäminen

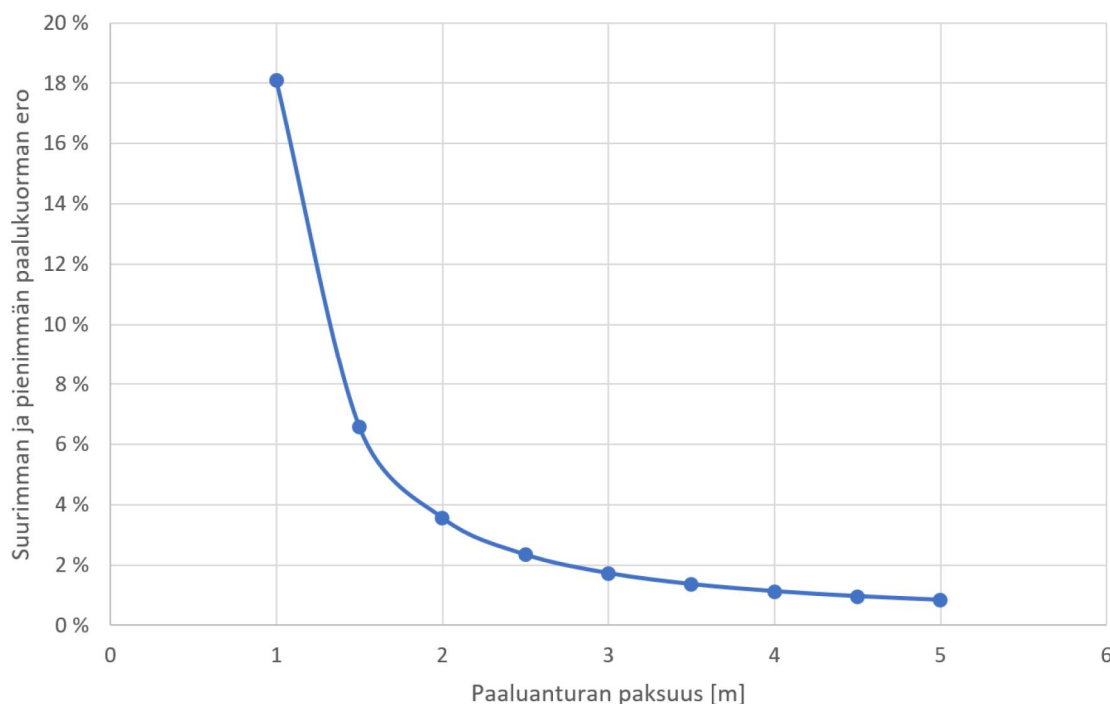
Kuten havaitaan, on paaluanturan jäykkyyden mallintamisella huomattava merkitys paalutuksen rakenteelliselle toiminnalle. Näin ollen paalutuksen suunnittelussa on tärkeä selvittää paaluanturan todellinen toimintamalli. Esimerkiksi taipuisasti toimivan paaluanturan suunnittelu täysin jäykkänä voi johtaa siihen, ettei keskialueen paalujen kapasiteetti riitä muodostuville paaluvoimille. Tähän liittyvä problematiikka onkin, kuinka paksu paaluanturan tulee olla, jotta sitä voidaan käsitellä täysin jäykkänä.

Ghali'n (1999) tekemän sillan pilaripaaluperustukseen kohdistuvan tutkimuksen mukaan paaluperustuksen suunnittelu voidaan toteuttaa täysin jäykkänä, mikäli paalutuksen dimensiosuhde L/T ei ylitä arvoa 2,4, missä L on pilarin keskilinjan etäisyys paalutuksen kauimmaisen nurkkapaalun keskeltä ja T on paaluanturan paksuus. Edellä tarkastellulle 16 paalun anturalle tämän mukaan määritetty paksuus olisi 884 mm.

Mikäli tarkasteltava antura suunnitellaan ristikkomenetelmän suositeltavan puristussauvan kaltevuuden 45° mukaisesti siten, että loivinkin puristussauva täyttää tämän vaatimuksen, tulisi paaluanturan tehollisen korkeuden olla vastaava kuin pilarin keskilinjan ja kauimmaisen nurkkapaalun välisen etäisyyden. Tällöin tarkasteltavan paaluanturan paksuudeksi tulisi 2121 mm. Yleensä laajojen paaluanturoiden mitoitus tehdään kuitenkin käsitellen anturaa pilarilaattana, jolloin puristussauvan kaltevuus jää pienemmäksi kuin 45° , eli antura tulee raudoittaa myös leikkausrasituksia vastaan.

Cheng'n (2005, pp. 105) mukaan jäykän paaluanturan korkeus voidaan määrittää tarkastelemalla anturaan syntyviä muodonmuutoksia. Tällöin paaluanturan voidaan ajatella olevan riittävän jäykkä, kun anturan korkeuden kasvattaminen ei enää aiheuta merkittävää muutosta anturan taipumalle. Tarkastellaan tähän periaatteeseen pohjautuen riittävän jäykälle paaluanturalle tarvittavaa paksuutta. Paaluanturan taipuman sijasta tarkastellaan paaluryhmän suurimman ja pienimmän paalukuorman välistä suhdetta, sillä kuten aikaisemmassa esimerkissä havaittiin, on paalukuormien suhteellinen suuruus anturan jäykkyyttä hyvin kuvaava indikaattori.

Kuvassa 18 on esitetty edellä tarkastellun paalutuksen pienimmän ja suurimman paalukuorman prosentuaalinen ero paaluanturan paksuuden funktiona.



Kuva 18. Paaluanturan paksuuden vaikutus paalukuormien jakautumiseen. Tarkastelussa paalujen välinen etäisyys on 1 m.

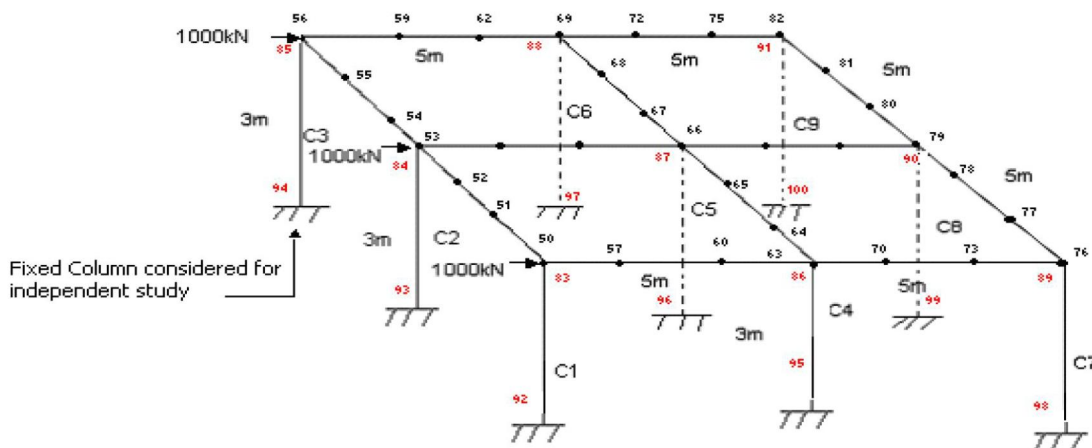
Kuvan 18 mukaan paaluanturan paksuntaminen vaikuttaa paalukuormien jakautumiseen merkittävästi enemmän, kun paaluantura on verrattain ohut. Paksummilla paaluanturoilla anturan korkeuden muutos ei sen sijaan vaikuta enää yhtä merkittävästi. Paaluanturan voidataan todeta olevan riittävän jäykkä, kun muodostuvien paalukuormien ero on merkityksettömän pieni, eli paaluantura toimii jäykän kappaleen tavoin jakaen kuormituksen tasaisesti kaikille paaluille. Riittävän jäykkyyden todentamiselle ei liene löytyvän absoluuttista arvoa, vaan suunnittelijan tulee tapauskohtaisesti arvioida, kuinka paksuksi antura tulee tehdä, jotta muodostuvat paalukuormat eivät eroa merkittävästi toisistaan. Esimerkiksi tarkastellun paaluanturan tapauksessa voidaan kuvan 18 perusteella havaita, että kasvatettaessa anturan paksuutta 2,0 metristä 2,5 metriin pienenee suurimman ja pienimmän paalukuorman ero ainoastaan n. 1%. Tällöin 2 m paksun anturan voidaan todeta olevan jo hyvin jäykkä, kun verrattain suuri anturan paksuuden kasvatus aiheuttaa suhteellisen pienen eron paalukuormien jakautumisessa.

3. PAALUPERUSTUS OSANA RAKENNEJÄRJESTELMÄÄ

Rakennemallissa paaluperustus yksinkertaistetaan tavallisesti joko täysin jäykäksi tai nivelelliseksi liitokseksi. Todellisuudessa paalutukseen syntyy ulkoisten rasitusten seurauksena muodonmuutoksia, jolloin paalutuksen kokonaisjäykkyys on täysin jäykän ja nivelellisen tuennan välillä. Tässä luvussa käsitellään kirjallisuuskatsauksena paaluperustuksen vaikutusta kehärakenteiselle rungolle. Luvussa esitellään myös periaate tasopaalutuksen kuvaamiseksi kolmella jousella rakennemallissa. Lisäksi tarkastellaan perustusliitoksen joustavuuden huomioon ottamista rungon stabiiliteetissa.

3.1 Paaluille perustettu rakennusrunko

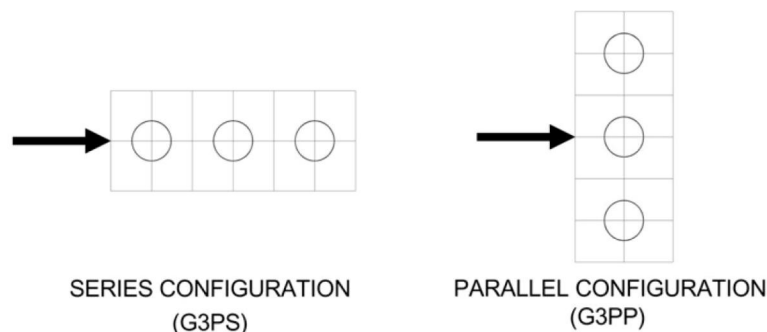
Perustuksen ja rakennusrungon vuorovaikutusta on tutkittu 1950-luvulta lähtien useissa tutkimuksissa, joskin paaluperustuksen vaikutusta rakennusrungolle on tutkittu historiallisesti verrattain vähän. (Chore et al, 2010) Kuitenkin viime aikoina paaluperustuksen ja rakennusrungon yhteisvaikutusta käsitteleviä tutkimuksia on alettu suorittaa enemmän. Paaluperustuksien vaikutuksia kuvan 19 mukaiselle yksikerroksiselle kehärakenteiselle rungolle on tutkinut muun muassa Chore et al (2009, 2010), Dode et al (2014) sekä Srivastava et al (2016).



Kuva 19. Kehärakenteisen rungon rakennemalli jäykillä perustusliitoksilla (Dode et al, 2014)

Chore et al. (2009) tutkivat kahden erilaisen konfiguraation omaavan paalutuksen vaikutusta kuvan 19 mukaiselle rungolle verraten täysin jäykkiin perustusliitoksiin. Kuvassa 19 esitetty runko koostuu teräsbetonisista pilareista ja palkeista sekä näiden päällä lepäävästä teräsbetonisesta laatasta. Tutkimuksessa käsitellyt paalutukset ovat kolmen paalun

lineaarisia ryhmiä, joissa paalulinjojen suuntaa suhteessa kuormitukseen vertaillaan kuvassa 20 esitetysti. Paalut ovat tutkimuksessa saveen tunkeutuvia kitkapaaluja ja paalut yhdistävää anturaa käsitellään taipuisana laattana.



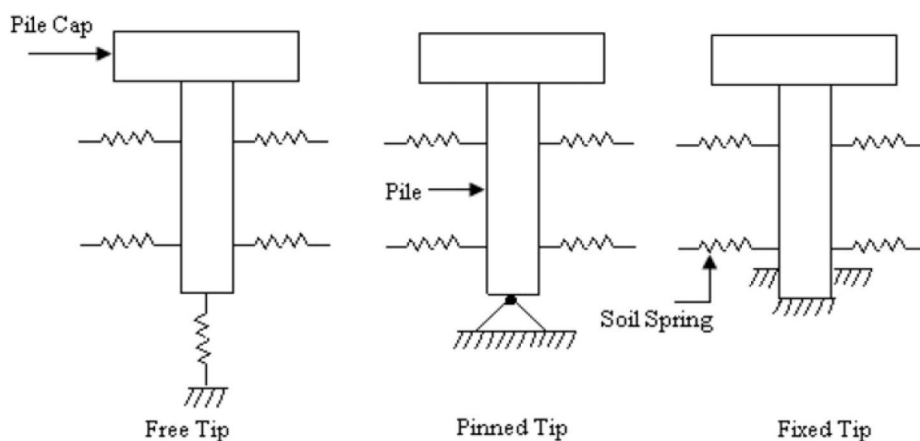
Kuva 20. Paalutuksen erilaiset konfiguraatiot: sarjamuotoinen (G3PS) ja rinnakkainen (G3PP). (Chore et al, 2009)

Tutkimuksessa (Chore et al, 2009) vertaillaan kahta erilaista FEM-analyysiin perustuvaa tapaa paalutuksen huomioon ottamisessa rakennemallissa. Ensimmäinen tavoista käsittelee paaluryhmää omana kokonaisuutenaan, jonka perusteella paalutukselle määritetään vertikaalinen ja horisontaalinen jäykkyys, joita hyödynnetään rungon rakennemallissa. Toinen tutkimuksessa käytetty tapa on mallintaa paaluperustukset sekä runko yhdistettynä kokonaisuutena.

Chore et al. (2009) mukaan rungon vaakasuuntaisen siirtymän havaitaan kasvavan, kun paaluperustuksen vaikutus otetaan rakennemallissa huomioon. Ratkaisussa, jossa paaluperustuksen jäykkyysominaisuudet on määritetty erikseen ja yhdistetty sitten rungon rakenneanalyysiin, rungon yläosan vaakasuuntainen siirtymä kasvaa verraten täysin jäykkien perustuksien mukaiseen rakennemalliin n. 136% sarjamaiselle paaluryhmän konfiguraatiolle (G3PS) ja n. 121% rinnakkaiselle paaluryhmän konfiguraatiolle (G3PP), kun paalujen välinen etäisyys on kaksi kertaa paalujen halkaisijan suuruinen. Kasvattaessa paalujen välistä etäisyyttä rungon siirtymän havaitaan pienenevän kummankin paaluryhmän tapauksessa. Analyysissä, jossa runko ja paaluperustukset on mallinnettu integroituna rakennemallina rungon yläosan vaakasuuntainen siirtymä kasvaa n. 125% sarjamaisien paalutusten tapauksessa ja n. 132% rinnakkaisten paalutusten tilanteessa. Integroidussa rungon ja paalutuksien rakennemallissa paalujen välisen etäisyyden muuttamisella ei tutkimuksen perusteella havaita olevan vaikutusta rungon yläosan vaakasuuntaiselle siirtymälle. Chore & Ingle (2008) havaitsivat paaluanturan ja maan yhteisvaikutuksen olevan myös merkittävä tekijä rungon siirtymien kannalta. Chore & Ingle (2008) mukaan rakennemallissa, jossa paaluanturan ja maan yhteisvaikutus on otettu huomioon, on rungossa havaittavat siirtymät pienempiä, kuin rakennemallille, jossa yhteisvaikutusta maan ja paaluanturan välillä ei ole otettu huomioon.

Paaluperustuksen vaikutus rungon pilareissa vaikuttaville maksimimomenteille on Chore et al (2009) mukaan merkittävä. Integroidussa analyysissä paaluperustuksen vaikutuksesta rungon pilarien suurin positiivinen momentti kasvaa 11% ja suurin negatiivinen momentti kasvaa 21,55% sarjamaisten paaluryhmien tapauksessa verraten täysin jäykkien perustusliitosten rakennemalliin. Vastaavasti rinnakkaisten paaluryhmien tapauksessa rungon pilarien suurin positiivinen momentti kasvaa 14,8% ja suurin negatiivinen momentti kasvaa 17,31% tutkimuksen perusteella, kun rakennejärjestelmää käsitellään yksittäisenä kokonaisuutena.

Chore et al (2010) tekemässä tutkimuksessa kuvan 19 mukaista runkoa käsitellään kolmen paalun ryhmien lisäksi myös kahdesta pystypaalusta koostuvilla paaluryhmillä, jotka saavat vastaavasti sarjamuotoisen ja rinnakkaisen konfiguraation. Kyseisessä tutkimuksessa myös paalujen alapään kiinnitysasteen vaikutusta arvioidaan. Chore et al (2010) tarkastelemat paalujen alapään kiinnitysasteet on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Paalun alapään rakennemallit vasemmalta lukien: vapaa pää, nivelellinen kiinnitys ja jäykkä kiinnitys. (Chore et al, 2010)

Chore et al (2010) tutkimuksessa paaluperustuksen jäykkyys määritetään FEM-laskentaan perustuen erillisenä kokonaisuutena, jossa koko paaluperustuksen jäykkyyden muodostamisessa huomioon niin paalun, maan kuin paaluanturankin osajäykkyydet. Paaluperustuksen erillisen tarkastelun myötä perustukselle määritetään ekvivalentit jäykkyydet pysty- ja vaakasuunnissa, joita hyödynnetään koko rungon rakenneanalyyysissä.

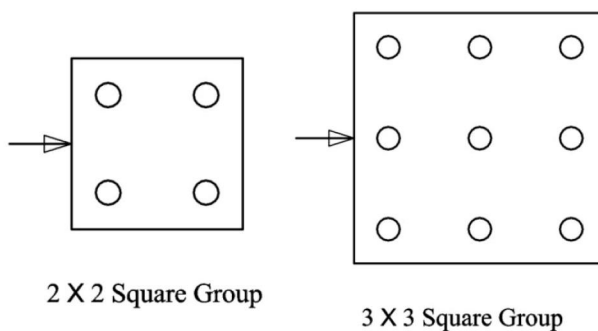
Chore et al (2010) mukaan paalutuksen jäykkyyden huomioon ottamisen seurauksena rungon yläosan siirtymä kasvaa 42-103% verrattuna täysin jäykkien perustusliitosten rakennemalliin varioitaessa paaluryhmissä paalutuksen konfiguraatiota ja paalumäärää, paalujen välistä etäisyyttä, paalujen poikkileikkauksen halkaisijaa sekä paalun alapään kiinnitysastetta. Tutkimuksen mukaan paalujen välisen etäisyyden kasvattaminen pienentää vaakasuuntaista siirtymää. Samoin paalumäärän kasvattamisen sekä paalun halkaisijan suurentamisen havaitaan pienentävän rungon vaakasuuntaista siirtymää tutkimuksen

perusteella. Myös paaluryhmän konfiguraation havaitaan vaikuttavan siirtymään siten, että sijoitettaessa paalut rinnakkain, on runkoon muodostuvat siirtymät suurempia. Tutkimuksen perusteella rungon siirtymä on pienempi nivelellisesti tai jäykästi alapäästään kiinnitetyle paalutuksille kuin vapaan alapään kiinnityksen omaavalle paalutukselle. Tutkimuksen mukaan otettaessa paaluperustuksen jäykkyys huomioon kasvaa rungon pilarien suurin positiivinen taivutusmomentti 14,98% ja suurin negatiivinen momentti kasvaa 27,20% verrattuna täysin jäykkiin pilarien perustusliitoksiin.

Srivastava et al (2016) tutkivat paaluperustuksen vaikutusta kuvassa 19 esitetyn rungon siirtymille. Tutkimuksessa käsiteltiin kahden ja kolmen paalun ryhmiä järjestettynä rinnakkain sekä sarjamaisesti vaakakuormitukseen nähden. Tutkimuksessa paalutuksen pysty- ja vaakasuuntainen jäykkyyskomponentti määritetään paalutusta erikseen käsittelevän ohjelman kautta ja näitä hyödynnetään koko rungon yhteisvaikutusta käsittelevässä rakennemallissa.

Srivastava et al (2016) mukaan tarkasteltaessa kahden paalun ryhmää, jossa paalut on sijoitettu vaakakuormitukseen nähden peräkkäin, kasvaa rungon yläosan siirtymä 217% verrattuna täysin jäykkien perustusliitosten rakennemallin mukaiseen siirtymään, kun paalujen välinen etäisyys on kolme kertaa paalun halkaisijan suuruinen. Vastaavasti tarkasteltaessa kahden paalun ryhmää, jossa paalut on sijoitettu vaakakuormitukseen nähden rinnakkain, on rungon vaakasuuntainen siirtymä tutkimuksen mukaan 230% suurempi kuin täysin jäykkien perustusliitosten tapauksessa. Tutkimuksen mukaan kasvatettaessa paalujen välistä etäisyyttä pienenee rungon vaakasuuntainen siirtymä. Samoin paalun halkaisijan kasvattaminen sekä paalumäärän lisääminen pienentää rungon vaakasuuntaista siirtymää tutkimuksen perusteella.

Samankaltaisiin tuloksiin päätyivät myös Dode et al (2014), jotka tutkivat kuvan 19 mukaista runkoa perustettuna neliön muotoon ryhmitetyille paalutuksille. Tutkimuksessa tarkastellaan paalun halkaisijan suuruuden sekä paalujen välisen etäisyyden vaikutusta rungon siirtymille ja pilarien taivutusmomenteille. Kuvassa 22 on esitetty Dode et al. (2014) tarkastelemat paalutukset.

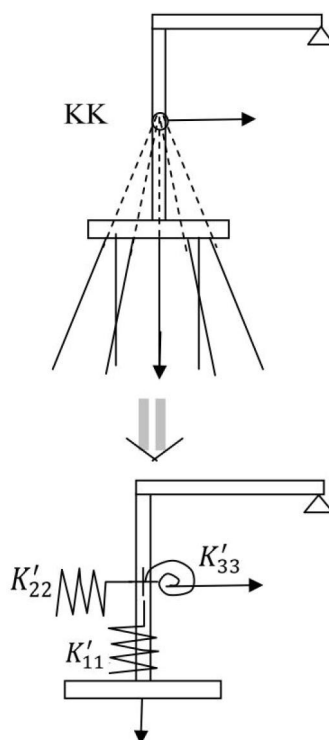


Kuva 22. Dode et al. (2014) tarkastelemat neljän ja yhdeksän paalun neliömuotoon sijoitetut paaluryhmät.

Dode et al. (2014) esittelemässä tutkimuksessa paalutuksen jäykkyydet määritellään erikseen paalutusta käsittelevälle ohjelmalla, jonka myötä paalutuksen vaaka- ja pystysuuntaisia jäykkyyksiä voidaan hyödyntää koko rungon rakennemallissa. Tutkimuksen mukaan rungon huipun vaakasuuntainen siirtymä kasvaa 58-152%, kun paaluperustuksen vaikutus otetaan huomioon verrattuna täysin jäykkiin perustusliitoksiin. Paalun halkaisijan kasvattaminen ja paaluvälin kasvattaminen pienentää rungon siirtymää tutkimuksen perusteella. Pilarien suurin positiivinen taivutusmomentti kasvaa tutkimuksen perusteella 14-15% ja suurin negatiivinen taivutusmomentti kasvaa 26-28%, kun paaluperustuksen vaikutus otetaan huomioon verraten täysin jäykkien perustusten rakennemallin mukaisiin taivutusmomenttien arvoihin. Tutkimuksen mukaan paalujen halkaisijan suuruuden vaikutus muodostuville taivutusmomenteille on marginaalinen.

3.2 Paalutuksen kuvaaminen jousilla

Paaluperustuksen kykyä vastustaa kuormituksen aiheuttamia siirtymiä ja kiertymiä voidaan rakennemallissa kuvata paalutuksen jäykkyyttä ilmentävillä jousilla. Tasopaalutus voidaan kuvata rakennemallissa kolmella jousella (pysty- ja vaakasuuntaiset translaatiojouset sekä kiertymäjousi). Mikäli rakennemallin koordinaatisto on yhteneväinen paalutuksen pääjäykkyys-koordinaatistoon, voidaan paaluperustusta kuvaavina jousivakioina käyttää kappaleen 2.3.1 mukaisesti paalutuksen pääjäykkyyksiä, sijoitettuna paalutuksen kiertokeskiöön kuvassa 23 esitetyti.



Kuva 23. Paaluperustuksen jäykkyyden kuvaaminen kolmella kiertokeskiöön sijoitetulla jousella. (RAK-11.2100, Aalto-yliopisto, muokattu)

Käytännössä paalutuksen kiertokeskiö ei kuitenkaan yleensä sijaitse perustusliitoksen tasossa, jossa laskentamallissa paaluperustuksen jäykkyyttä kuvataan. Havainnollistetaan paalutuksen jäykkyyden muodostumista tarkastelutason suhteen kuvassa 23 esitetyn tasokehän paalutukselle. Paalutuksen jäykkyydsmatriisi kiertokeskiön suhteen laskettuna on

$$K' = \begin{bmatrix} K'_{11} & 0 & 0 \\ 0 & K'_{22} & 0 \\ 0 & 0 & K'_{33} \end{bmatrix}$$

Kun paalutuksen jäykkyyden tarkastelutasona käytetään pilarin juuren tasoa, jonka oletetaan sijaitsevan anturan yläreunassa, saadaan paalutuksen jäykkyydsmatriisiksi

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & K_{23} \\ 0 & K_{23} & K_{33} \end{bmatrix}$$

Tarkasteltaessa paalutusta kiertokeskiöstä poikkeavassa kohdassa, eivät paalutusta rasittavat kuormakomponentit ole enää toisistaan riippumattomia. Tämä on selvästi havaittavissa verratessa edellä esitettyjä jäykkyydsmatriiseja. Kiertokeskiön suhteen tarkastellun paalutuksen jäykkyyttä voidaan pitää paalutuksen ns. vakiojäykkyytenä, sillä kuten verraten yhtälöön (2.12) havaitaan, aiheuttaa kukin kuormakomponentti paalutukselle siirtymää ainoastaan vaikutussuunnassaan. Sen sijaan tarkasteltaessa paalutuksen jäykkyydsmatriisia pilarin juuren (perustusliitoksen) tasossa, huomataan selvästi vaakasuuntaisen siirtymän ja kiertymän välinen yhteys jäykkyystermin K_{23} myötä, joka käytännössä tarkoittaa paalujen vaakakomponenttien kiertymäjäykkyyttä. Pystysuorilla paaluilla vaakakomponenttia ei luonnollisesti ole, joten termi aiheutuu vinopaalujen vaikutuksesta. Kuten kuvasta 23 havaitaan, on vinopaalujen momenttivarsi kiertokeskiön suhteen nolla, jolloin myös termi K_{23} nollaantuu tarkasteltaessa paalutuksen jäykkyyttä kiertokeskiön suhteen. Toisin sanoen jäykkyystermin K_{23} vaikutus paalutuksen analysoinnissa voidaan nähdä myös niin, että perustusliitoksen tasossa tarkasteltuna leikkausvoima aiheuttaa vaakasuuntaisen siirtymän lisäksi myös kiertymää paalutuksen kiertokeskiön suhteen ja vastaavasti taivutusmomentti saa aikaan sivuttaissiirtymää perustuksen tasossa. Näin ollen tasopaalutuksen, joka koostuu niin pysty- kuin vinopaaluistakin, jäykkyys ei ole vakio, mikäli tarkastelutaso poikkeaa kiertokeskiöstä, vaan horisontaali- ja kiertymäjäykkyydet ovat riippuvaisia tarkastelutasoon kohdistuvien taivutusmomentin ja leikkausvoiman suhteesta.

Yleisessä tapauksessa, tarkastelutasosta riippumatta, tasopaaluperustuksen jousivakiot voidaan yksinkertaistaen määrittää Hooken lain mukaan, kun tunnetaan tietyn kuormitus-tilanteen aikaansaama siirtymätila tarkastelutasossa. Tällöin tasopaalutuksen jousivakiot voidaan ratkaista voiman ja sen vaikutussuuntaa vastaavan siirtymän yhteydestä, jolloin tasopaalutuksen jäykkyysskomponentteja vastaavat jousivakiot voidaan esittää muodossa

$$\begin{aligned}
k_z &= \frac{F_z}{\delta_z} \\
k_x &= \frac{F_x}{\delta_x} \\
k_\varphi &= \frac{M_y}{\varphi_y}
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Näin määritetyt jousivakiot ovat käyttökelpoisia mm. FEM-laskentamallin perustustuen vapautuksina syötettäviksi. Kuitenkin kuvattaessa tasopaalutusta kolmella jousella ei paalutukseen synny kiertymää vaakasuuntaisesta rasituksesta, eikä vastaavasti taivutusmomentti saa aikaan sivuttaissiirtymää, vaan kutakin kuorman osakomponenttia vastustaa niille määritelty jousi. Luvussa 4 on tarkasteltu esimerkkikohteessa tasopaalutuksen huomioon ottamista tasokehän FEM-laskentamallissa edellä esitetyn periaatteen mukaisesti kolmen jousen tavoin. Luvussa 4 on myös vertailtu kolmen jousen yksinkertaistettua paalutuksen ratkaisua kokonaisuudessaan FEM-laskentaan mallinnettuun paaluperustukseen.

3.3 Paalutuksen vaikutus rungon stabiiliteetille

Kuten todettua korostaa perustusliitoksen joustavuus runkoon muodostuvaa siirtymätilaa. Näin ollen joustavalla perustusliitoksella voidaan todeta olevan negatiivinen vaikutus rungon stabiiliteetille. Tämän tutkimuksen painottuessa kehärakenteiseen runkotyyppiin, on perustuksen joustavuuden vaikutus pilarin stabiiliteetille työn aiherajauksen kannalta olennainen tutkimuksen osa-alue.

Pilarin stabiiliteetin riippuessa sen päiden joustavuudesta voidaan paaluperustuksen vaikutusta tarkastella pilarin nurjahdusanalyysissä sijoittamalla pilarin paaluperustuksella tuettuun päähän paalutuksen jäykkyyttä vastaavat jousituennat. Tässä luvussa esitetään sauvan kimmoviivan linearisoituun differentiaaliyhtälöön perustuva yleinen ratkaisu jousitetun sauvan nurjahdusanalyysille.

Kuvan 24 mukaisen tasapainossa olevan sauvan linearisoitu differentiaaliyhtälö on

$$EIv^{iv}(z) + Pv''(z) = 0 \tag{3.2}$$

Kun merkitään $k = \sqrt{P/EI}$, voidaan yhtälö (3.2) kirjoittaa muodossa

$$v^{iv}(z) + k^2v''(z) = 0 \tag{3.3}$$

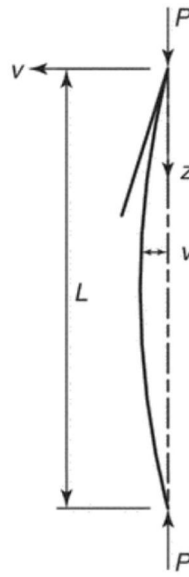
Differentiaaliyhtälön (3.3) ratkaisu on tunnetusti

$$v(z) = A + Bz + C \sin(kz) + D \cos(kz) \tag{3.4}$$

jonka 1. – 3. asteen derivaatat ovat

$$\begin{aligned}v'(z) &= B + Ck \cos(kz) - Dk \sin(kz) \\v''(z) &= -Ck^2 \sin(kz) - Dk^2 \cos(kz) \\v'''(z) &= -Ck^3 \cos(kz) + Dk^3 \sin(kz)\end{aligned}\tag{3.5}$$

Yhtälön (3.4) tuntemattomat kertoimet A, B, C ja D voidaan ratkaista muodostamalla neljä sauvan päiden tuentoja vastaavaa reunaehtoa. (Galambos & Surovek, 2008, pp.36-38, Tuomala, s.29-30)



Kuva 24. Päistään nivelellisesti tuettu sauva (Galambos & Surovek, 2008, pp. 37)

Reunaehtojen muodostamiseksi tarvitaan sauvan linearisoidusta differentiaaliyhtälöstä tunnetut taivutusmomentin ja leikkausvoiman ratkaisut, jotka voidaan esittää kaavojen (3.6) ja (3.7) muodossa, kun sauvan taivutusjäykkyys on vakio.

$$EIv'' = -M\tag{3.6}$$

$$EIv''' = -Q\tag{3.7}$$

(Salmi & Kuula, 2012, s.62)

Kuvassa 24 esitetyn sauvan ollessa niveltuettu ja sivusiirtymätön voidaan sen päiden reunaehdot taipuman ja taivutusmomentin suhteen esittää kohdassa $z = 0$ sekä vastaavasti kohdassa $z = L$

$$v(z) = 0\tag{3.8}$$

$$EIv''(z) = 0\tag{3.9}$$

Näin käyttäen yhtälöitä (3.6) - (3.9) saadaan muodostettua sauvan päiden reunaehdoista neljän yhtälön yhtälöryhmä, joka voidaan esittää matriisimuodossa

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -k^2 \\ 1 & L & \sin(kL) & \cos(kL) \\ 0 & 0 & -k^2 \sin(kL) & -k^2 \cos(kL) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.10)$$

Matriisiyhtälön (3.10) kertoimet A, B, C ja D määrittelevät sauvan taipuman, joten ainakin yhden näistä kertoimista tulee olla erisuuri kuin nolla. Näin ollen yhtälö toteutuu, kun kerroin matriisin determinantti asetetaan nolllaksi. Determinantin pienimmän positiivisen nollakohdan myötä saada johdettua arvo muuttujalle kL , jonka myötä saadaan arvo sauvan kriittiselle kuormalle ja nurjahduspituudelle, kun tiedetään, että $k = \sqrt{P/EI}$ ja $P = \pi^2 EI / L_{cr}$ (Galambos & Surovek, 2008, pp. 38, 58-59). Tällöin sauvan nurjahduspituus L_{cr} voidaan määrittää muuttujan kL perusteella liitteessä A johdetusta lausekkeesta

$$L_{cr} = \frac{\pi}{kL} \cdot L \quad (3.11)$$

missä L on sauvan tuentojen väli.

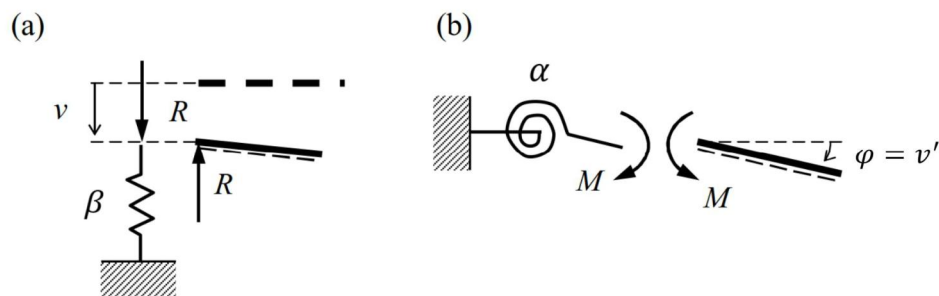
Tarkastellaan seuraavaksi kuvan 26 mukaista joustavasti päistään tuettua sauvaa. Hooken lain mukaan voiman ja siirtymän välistä yhteyttä voidaan tunnetusti kuvata jousivakiolla. Translaatiojousituennalle yhteys kirjoitetaan kuvan 25 a-kohdan merkintöjen mukaisesti muodossa

$$R = \beta v \quad (3.12)$$

missä β on translaatiojousivakio. Vastaavasti rotaatiojousituennalle momentin ja kiertymän välinen yhteys esitetään kuvan 25 b-kohdan merkintöjen mukaisesti

$$M = \alpha v' \quad (3.13)$$

missä α on rotaatiojousivakio. (Rak-54.1300, Aalto-yliopisto, s.74)



Kuva 25. a) translaatiojousituenta, b) rotaatiojousituenta (Rak-54.1300, Aalto-yliopisto, s.74, muokattu)

Kun huomioidaan vielä normaalivoiman vaikutus, voidaan kuvan 26 mukaisen sauvan päiden jousituntoja vastaavat momentti- ja leikkausvoimatasapainojen reunaehdot esittää sauvan kohdassa $z = 0$,

$$-EIv'''(z) - Pv'(z) = \beta_T v(z) \quad (3.14)$$

$$-EIv''(z) = -\alpha_T v'(z) \quad (3.15)$$

ja vastaavasti sauvan kohdassa $z = L$

$$-EIv'''(z) - Pv'(z) = -\beta_B v(z) \quad (3.16)$$

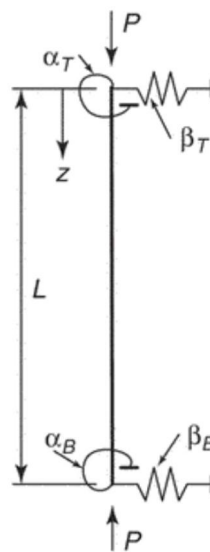
$$-EIv''(z) = \alpha_B v'(z) \quad (3.17)$$

missä α_T ja α_B ovat sauvan päiden rotaatiojousivakiot sekä β_T ja β_B vastaavasti translaatiojousivakiot. Sauvan nurjahdusanalyysin laskennassa on mielekästä käyttää lisäksi sauvan päiden rotaatio- ja translaatiojousivakioille dimensiottomia arvoja

$$R_T = \frac{\alpha_T L}{EI}; \quad R_B = \frac{\alpha_B L}{EI} \quad (3.18)$$

$$T_T = \frac{\beta_T L^3}{EI}; \quad T_B = \frac{\beta_B L^3}{EI}$$

Näin ollen sauvan päiden reunaehdoista muodostetun neljän yhtälön yhtälöryhmästä voidaan ratkaista matriisimuodossa jousituetun sauvan nurjahduspituus ja kriittinen kuorma vastaavasti kuin nivelpäiselle sauvalle esitettiin. (Galambos & Surovek, 2008, pp. 38, 58-59) Liitteessä A on johdettu kuvan 26 mukaisen sauvan nurjahdusanalyysin ratkaisu.



Kuva 26. Rotaatio- ja translaatiojousilla päistään tuettu sauva (Galambos & Surovek, 2008, pp. 59)

4. CASE: TURBIINIHALLI

Tässä luvussa tarkasteltavana kohteena on paaluille perustettu teräsrakenteinen turbiinihalli. Turbiinihallin runko koostuu teräsrakenteisista kehistä, joissa katon pääkannattajina toimivat teräspuutkiprofiilivalmisteiset ristikot. Kehän pilarit ovat valssattuja HEA-profiileja. Hallin runko on jäykistetty pituussuunnassa ulkoseinälinjojen vinositeillä ja kattotason vaakasuuntaisella ristikoinnilla. Rungon vaakasuuntaisena jäykistykseenä toimivat vastaavasti päätyseinien vinosidejärjestelmät, joille jäykistetty kattotaso välittää rungon vaakasuuntaiset kuormat. Rungon vaakasuuntaisena jäykistykseenä toimivat osaltaan myös jäykästi perustetut pääkehät.

Tarkasteltavaa kehää kuormittavat oman painon lisäksi pysyvinä kuormina katolla sijaitsevat lauhduttimet ja polttoainekuljetin sekä ulkoseinien sandwich-paneelit. Kehää rasittavat muuttuvat kuormat ovat katon hyöty- ja lumikuorma sekä tuulikuorma. Lisäksi kehän pilareita rasittaa nosturiradalta tulevat kuormitukset. Nosturiradan aiheuttamat kuormitukset määritetään dlubal RFEM Craneway -ohjelmalla (vs. 8.14.03). Kuormitukset ja kuormitusyhdistelmät määritellään eurokoodien mukaisesti. Liitteessä B on esitetty tarkasteltua kehää rasittavat kuormitukset sekä käsitellyt kuormitusyhdistelmät.

Paaluperustuksen jäykkyyden vaikutusta tutkitaan rungon rasitetuimman pääkehän mitoituksessa laskemalla kehä ensin olettaen perustusliitos täysin jäykäksi. Tämän rakenneanalyysin perustuskuormien mukaan määritetään tarvittava paalutus, jolle lasketaan rotaatio- ja translaatiojäykkyydet. Kun paalutuksen jäykkyys tunnetaan, suoritetaan kehän rakenneanalyysi uudelleen ottaen huomioon paalutuksen joustavuus. Paalutuksen jäykkyyden vaikutusta tutkitaan myös mallintaen paaluperustus kokonaisuudessaan laskentamalliin kytkettynä kehän pilarien perustusliitoksiin.

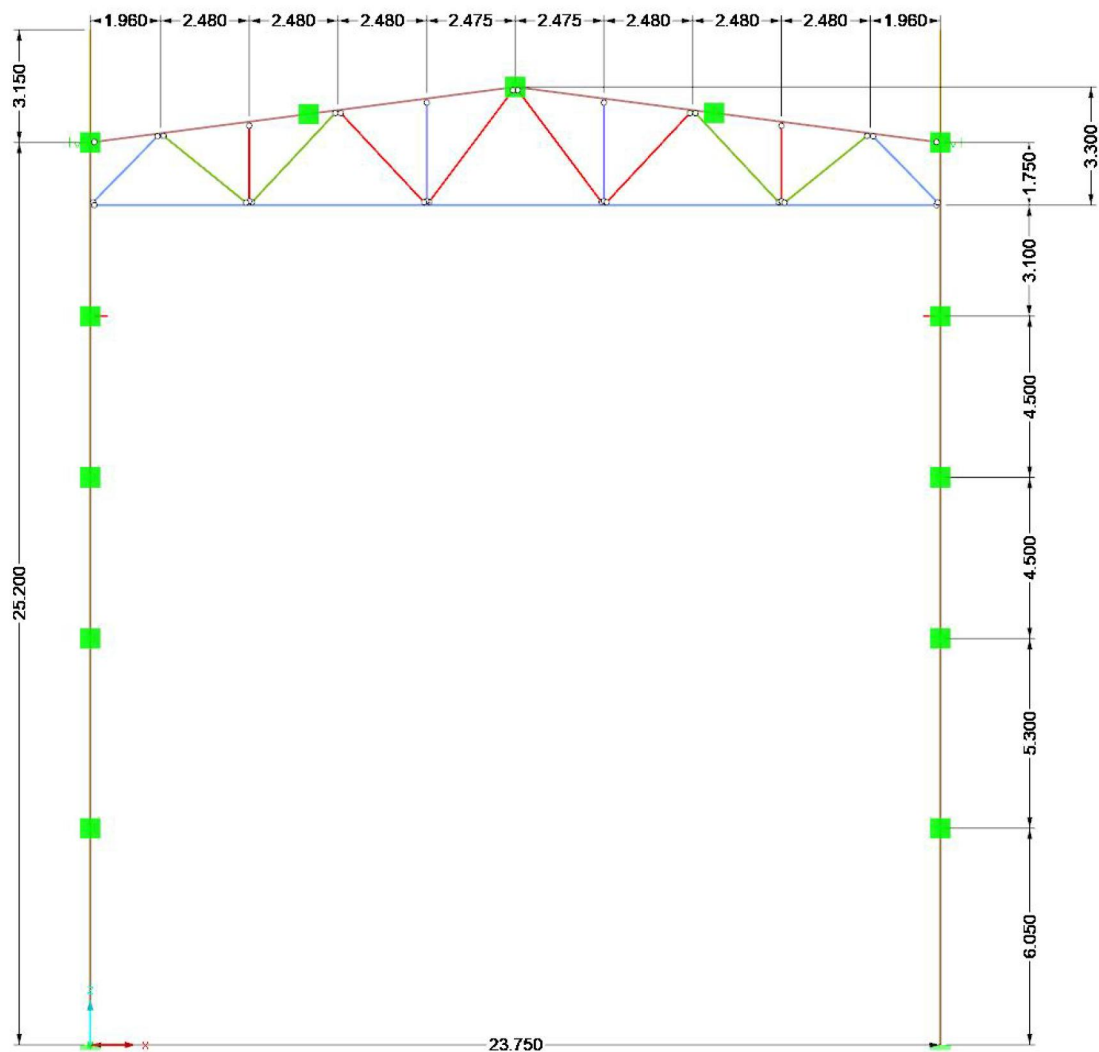
4.1 Pääkehän rakennemalli

Tarkastellun rungon pääkehän rakennemalli ja dimensiot on esitetty kuvassa 27. Pääkehän harjakorkeus on 26,75 m ja suunnassaan kehän leveys on 23,75 m. Tarkastellun ristikon korkeus on räystäällä 1,75 m ja harjalla 3,3 m.

Kattotason vaakasuuntaisen ristikoinnin jäykistävä vaikutus huomioidaan pääkehän rakennemallissa kehän ylänurkissa ristikon yläpaarten tasoon sijoitettavilla translaatiojousilla, joiden jousivakioiden arvo määritellään sallien kehälle käyttörajatilan mukaisista kuormituksista 35 mm siirtymä. Tällöin jäykistävää kattotasoa kuvaavien translaatiojousien arvoiksi saadaan rakennemalliin kehän molempiin ylänurkkiin 11500 kN/m.

Ristikon uumasauvat käsitellään päistään nivelellisinä sauvoina. Ristikko liittyy pilareihin jäykästi molemmista päistään. Kehän pilarit on tuettu heikommassa suunnassa nurjahtamista ja kiepahtamista vastaan vaakasiteillä. Pilarien perustusliitos käsitellään alustavasti jäykkänä ja tarkemmissa laskelmissa perustusliitosten joustavuus otetaan huomioon joko jousituentoina tai mallintaen perustus kokonaisuudessaan. Pilarien perustusliitoksia käsitellään kehään nähden vastakkaisessa suunnassa (pilarin heikompi suunta) nivelellisenä. Pilarien ja anturan välisen liitoksen oletetaan siirtävän rasitukset täysin jäykkänä kokonaisuutena.

Rungon epätarkkuudet otetaan huomioon RFEM-ohjelman Imperfection-toiminnalla, jossa kehän suuntaiset alkuvinoudet syötetään SFS-EN 1993-1-1, 2005-07 mukaisesti omana kuormitustapauksena kehän pilareille, jolloin alkuvinous tulee huomioiduksi automaattisesti kussakin kuormitusyhdistelmässä. Toisen kertaluvun vaikutukset otetaan huomioon kehän voimasuureiden laskennassa käyttäen RFEM-ohjelman P-delta -toimintoa.



Kuva 27. Pääkehän rakennemalli [m] täysin jäykillä perustusliitoksilla.

4.2 Paaluperustus

Paaluperustuksen suunnittelu aloitetaan määrittämällä tarkasteltavan kehän perustuskuormat mallintaen perustusliitos täysin jäykäksi. Käytetyssä RFEM-laskentamallissa perustusten kuormituspiste on pilarin juuressa paaluanturan yläreunassa. Näin ollen myös paalutuksen laskennassa origoksi valitaan pilarin juuren taso.

Määraävien kuormitusyhdistelmien perusteella selvitetään tarvittava paalutus siten, ettei yhdellekään paalulle tule omaa painoa enempää vetorasitusta missään kuormitusyhdistelmässä ja ettei paalujen puristuskapasiteetti luonnollisesti myöskään ylitä. Tällöin tarkasteltavat kuormitusyhdistelmät ovat tukikohtaisesti suurimman pystykuorman ja taivutusmomentin aiheuttama yhdistelmä sekä pienimmän pystykuorman ja suurimman taivutusmomentin sekä leikkausvoiman aiheuttamat yhdistelmät. Tarkasteltaessa teräsrakenteista runkoa, on rakenteiden oman painon vaikutus suhteellisen pieni, joten paalutuksen suunnittelussa määraävimmäksi tekijäksi muodostuu perustukseen kohdistuvan suuren taivutusmomentin ja leikkausvoiman hallinta ylittämättä paalujen vetokapasiteettia.

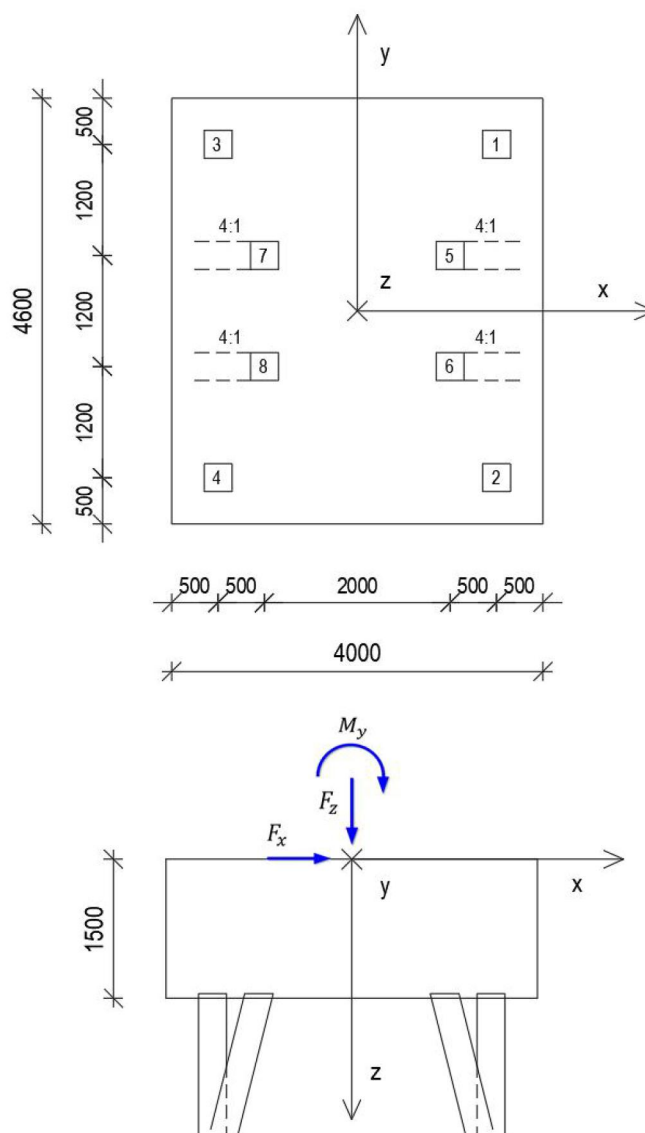
Paalutus suunnitellaan teräsbetonipaalutyypille RTB-300-16, jonka puristuskapasiteetin arvona käytetään murtorajatilassa 678 kN. (RT-Betonipaalut Tuotelehti PO-2016, 2018, s.13, PTL2, Jatkettu paalu, $c_u = 3 \text{ kN/m}^2$, P/L = 50/50). Paalujen betonin lujuusluokkana käytetään tarkastelussa C40/50. Tarkasteltaessa rasiusten jakautumista kimmoisesti, käytetään paalujen kimmokertoimenä betonin sekanttimoduulin arvoa $E_{cm} = 35,22 \text{ GPa}$ (kimmokertoimen ominaisarvo). Teräsbetonipaalujen raudoituksen vaikutusta paalujen jäykkyydelle ei tässä tutkimuksessa oteta huomioon. Myöskään viruman vaikutusta teräsbetonipaalujen kimmokertoimelle ei tässä tarkastelussa oteta huomioon, sillä tarkasteltaessa mitoittavia tilanteita, syntyvät määraävät rasitukset luonteeltaan lyhytaikaisista kuormista (tuulesta), joiden vaikutuksesta virumaa ei katsota aiheutuvan. Lisäksi paalujen sijaitessa maassa on viruman vaikutus verrattain vähäinen suhteellisen kosteuden ollessa suurempi kuin teräsbetonirakenteilla yleensä. (by211, osa 1, s. 47) Tukipaaluja käsitellään laskennassa päistään nivelellisesti tuettuina sauvoina, jolloin paalutuksen kapasiteetin tarkastelu suoritetaan paalujen normaalivoimien suhteen.

Paaluanturan korkeudeksi valitaan 1,5 m, jolloin paaluryhmän konfiguraatio huomioiden rasiusten jakautuminen anturassa on mahdollista tarkastella ristikkomenetelmän mukaisesti. Kovan pohjan syvyydeksi oletetaan paalutuksen laskennassa 20 m, jonka perusteella määritetään paalujen tunkeumasyvyyys. Työteknisesti ja myös käytännön suunnittelun kannalta on mielekästä käyttää samaa paalutusta mahdollisimman monessa perustusliitoksessa. Niin myös tässä tarkastelussa paalutus valitaan siten, että se toimii kehän molemmissa perustusliitoksissa.

4.2.1 Paalutuksen laskenta

Paalutuksen analysointi on luvussa 2.2.3 esitetyn siirtymämenetelmän systemaattisuuden vuoksi yksikertaista suorittaa taulukkolaskentana, johon tässä tarkastelussa käytetään MS Office Exceliä. Havainnollistetaan tasopaalutuksen laskennan kulku tutkitulle kehälle. Tässä esitetty tarkastelu suoritetaan kuormitusyhdistelmässä CO19 kehän vasemman puolisen perustusliitoksen rasituksille osana tutkimusta luodulla taulukkolaskentaohjelmalla. Käytännössä paalutus määritetään kokeilemalla erilaisia vaihtoehtoja, joista valitaan asetettujen reunaehtojen puitteissa tapauskohtaisesti sopiva paaluryhmä.

Tasopaalutuksen laskennassa origoksi valitaan pilarin juuren taso, jolloin paalujen yläpäiden koordinaatit tulee ilmoittaa tämän pisteen suhteen. Vinopaalujen kaltevuutena käytetään 4:1. Kuvassa 28 on esitetty paalutuksen geometria sekä valittu koordinaatisto.



Kuva 28. Paaluperustuksen geometria ja valittu koordinaatisto.

Kuvassa 29 on esitetty paalutuksen laskennan lähtötiedot sekä paalutyypin ja perustamispaikkaan liittyvät vakiot. Taulukon kolmessa viimeisessä sarakkeessa määritetään paalukohtaisesti suuntakulmaa vastaavat komponentit sekä paalun momenttivarsi valitun origon suhteen.

Paalu	Yläpään sijainti			Kaltevuus	Pinta-ala	Kimmokerroin	Pituus	Jäykkyys	Suuntakulmien kosinit		Mom. varsi
i	z_i	y_i	x_i	α_i	A	E	L	k_i	$p_{z,i}$	$p_{x,i}$	$r_{y,i}$
-	-	-	-	-	-	-	-	EA/L	$\cos\alpha_i$	$\sin\alpha_i$	$x_i p_{z,i} - z_i p_{x,i}$
-	m	m	m	deg	m ²	kN/m ²	m	kN/m	-	-	m
1	1,5	1,8	1,5	0,00	0,090	35220462	20,00	158492	1,00	0,00	1,50
2	1,5	-1,8	1,5	0,00	0,090	35220462	20,00	158492	1,00	0,00	1,50
3	1,5	1,8	-1,5	0,00	0,090	35220462	20,00	158492	1,00	0,00	-1,50
4	1,5	-1,8	-1,5	0,00	0,090	35220462	20,00	158492	1,00	0,00	-1,50
5	1,5	0,6	1	14,04	0,090	35220462	20,62	153760	0,97	0,24	0,61
6	1,5	-0,6	1	14,04	0,090	35220462	20,62	153760	0,97	0,24	0,61
7	1,5	0,6	-1	-14,04	0,090	35220462	20,62	153760	0,97	-0,24	-0,61
8	1,5	-0,6	-1	-14,04	0,090	35220462	20,62	153760	0,97	-0,24	-0,61

Kuva 29. Paalujen sijainti ja jäykkyyydet.

Valitun paalutuksen geometrian suhteen voidaan määrittää paalutuksen jäykkyysmatriisin paalukohtaiset alkio. Jäykkyysmatriisin symmetrisyyden seurauksena määritettäviä jäykkyystekijöitä on tasopaalutuksella kuusi. Paalukohtaisesti lasketut jäykkyysalkiot on esitetty kuvassa 30.

Paalu	Jäykkyysmatriisin alkio					
i	$k_{11,i}$	$k_{12,i} = k_{21,i}$	$k_{13,i} = k_{31,i}$	$k_{22,i}$	$k_{23,i} = k_{32,i}$	$k_{33,i}$
-	$k_i p_z^2$	$k_i p_z p_x$	$k_i p_z p_y$	$k_i p_x^2$	$k_i p_x p_y$	$k_i p_y^2$
-	kN/m	kN/m	kN	kN/m	kN	kNm
1	158492	0	237738	0	0	356607
2	158492	0	237738	0	0	356607
3	158492	0	-237738	0	0	356607
4	158492	0	-237738	0	0	356607
5	144715	36179	90447	9045	22612	56529
6	144715	36179	90447	9045	22612	56529
7	144715	-36179	-90447	9045	22612	56529
8	144715	-36179	-90447	9045	22612	56529

Kuva 30. Tasopaalutuksen paalukohtaiset jäykkyysalkiot.

Koko paalutuksen jäykkyysmatriisi muodostetaan laskemalla yksittäisten paalujen jäykkyysalkiot yhteen, jolloin tarkastellun tasopaalutuksen jäykkyysmatriisi valitun origon (pilarin keskilinjan juuren) suhteen ilmoitetaan kuvassa 31 esitetystä muodosta.

$$[K] = \sum \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{12} & k_{22} & k_{23} \\ k_{13} & k_{23} & k_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1212829 & 0 & 0 \\ 0 & 36179 & 90447 \\ 0 & 90447 & 1652546 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{kN/m} & \text{kN/m} & \text{kN} \\ \text{kN/m} & \text{kN/m} & \text{kN} \\ \text{kN} & \text{kN} & \text{kNm} \end{matrix}$$

Kuva 31. Tasopaalutuksen jäykkyysmatriisi.

Paaluvoimien laskentaa varten määritetään koko paalutukselle matriisiyhtälö luvun 2.2.3 mukaisesti, josta ratkaistaan paalutuksen siirtymät.

$$[K]\{\delta\} = \{f\} \rightarrow \{\delta\} = [K]^{-1}\{f\} \quad (4.1)$$

Paalutusta rasittava kuormitusvektori luetaan jäykällä perustusliitoksilla mallinnetun tasokehän FEM-laskentamallin perustuskuormista, joiden pystykomponenttiin lisätään myös paaluanturan oman painon vaikutus. Paaluanturan leveys määräytyy Paalutusohjeen PO-2016 mukaisten paalujen sijoittelua koskevien sääntöjen perusteella niin paalujen välisten etäisyyksien kuin paalun ja anturan reunaetäisyyksien mukaan. Tällöin paaluanturan ulkomitoiksi valitaan kehän suunnassa 4 m sekä vastakkaisessa suunnassa 4,6 m, jolloin anturan oma paino on 690 kN. Kuvassa 32 on esitetty näin määritetty kuormitusyhdistelmässä CO19 paalutusta rasittava kuormitusvektori.

$\{f\} = \begin{Bmatrix} F_z \\ F_x \\ M_y \end{Bmatrix} =$	F_z	1058,36	kN
	F_x	120,75	kN
	M_y	489,33	kNm

Kuva 32. Tasopaalutusta rasittava kuormitusvektori (CO19).

Nyt paalutuksen siirtymät valitussa origossa saadaan ratkaistua yhtälöstä (4.1), jolloin tarkastellussa tilanteessa saadaan kuvan 33 mukainen liiketila paalutukselle.

$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} \delta_z \\ \delta_x \\ \varphi_y \end{Bmatrix} =$	δ_z	0,000873	m
	δ_x	0,003009	m
	φ_y	0,000131	rad

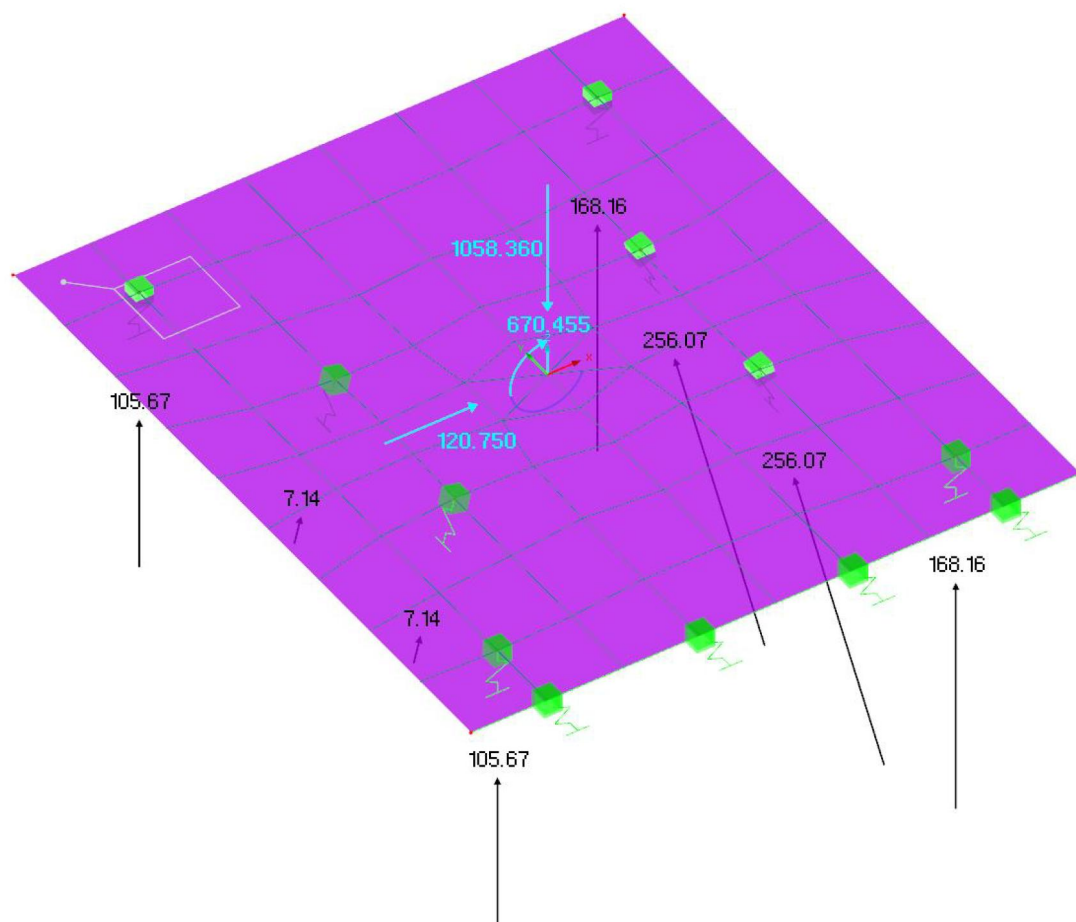
Kuva 33. Tasopaalutuksen siirtymät (CO19).

Ratkaistujen siirtymien perusteella voidaan määrittää kussakin paalussa vaikuttava aksiaalinen rasitus, kun paaluantura otaksutaan ideaalijäykäksi kappaleeksi, jolloin anturan siirtymätila aiheuttaa lineaarisesti paalujen rasitukset. Kuvassa 34 on esitetty kuormitusyhdistelmässä CO19 lasketut paaluvoimat.

Paalu	Paaluvoimat
i	N_i [kN]
-	$k_i(p_{z,i} \delta_z + p_{x,i} \delta_x + r_{y,i} \phi_y)$
-	CO19
1	169,55
2	169,55
3	107,06
4	107,06
5	254,64
6	254,64
7	5,70
8	5,70

Kuva 34. Tasopaalutuksen paaluvoimat anturan siirtymätilasta ratkaistuna (CO19).

Suoritetaan vertailu kyseisessä kuormitusyhdistelmässä RFEM-laskentamallissa. Mallinnetaan paaluantura täysin jäykkänä laattana ja syötetään perustusliitosta vastaavat rasi-tukset anturalle. Paalut mallinnetaan aksiaalijäykkyyttään vastaavina jousina. Tarkastel-lussa FEM-laskentamallissa tulee lisäksi huomioida pilarin juuressa sijaitsevan leikkaus-voiman aiheuttama lisämomentti anturan korkeuden suhteen, jolloin anturan alapintaan (paalujen yläpäiden tasoon) projisoitu taivutusmomentin arvo on $M_{AR.} = M_y + F_x \cdot 1,5 \text{ m} = 670,455 \text{ kNm}$. Kuvassa 35 on esitetty paaluperustuksen FEM-laskennassa käy-tetty rakennemalli sekä syntyneet paalukuormat.



Kuva 35. Paaluvoimat [kN] RFEM-laskentaohjelmalla ratkaistuna kuormitusyhdistelmän CO19 perustuskuormille [kN,kNm].

Kuvan 35 mukaan havaitaan siirtymämenetelmällä taulukkolaskentana määritettyjen paalukuormien vastaavan 1 – 2 kN tarkkuudella RFEM-laskentaohjelmalla määritettyjä paaluvoimia.

4.2.2 Paalutuksen jäykkyys

Tutkitaan paalutuksen mallintamisen vaihtoehtoja RFEM-laskentaohjelmassa. Ensimmäinen ratkaisu paalutuksen mallintamiselle on syöttää paaluanturan siirtymätilan perusteella johdetut jousivakiot perustusliitosten vapautuksiksi. Toinen paalutuksen toimintaa realistisemmin kuvaava tapa on mallintaa kokonaisuudessaan paalut sekä antura kytkettynä rakennusrunkoon laskentamallissa.

Paalutuksen yksinkertaistetut jousivakiot

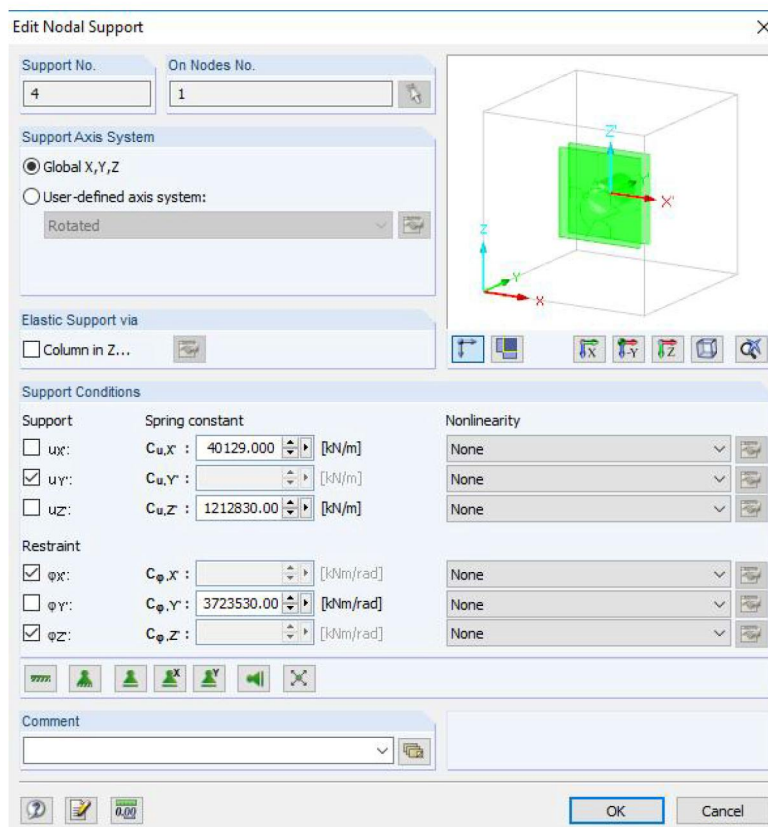
Kun paalutuksen siirtymätila tunnetaan, voidaan tarkastelutasoa vastaava tasopaalutuksen kokonaisjäykkyys määrittää yksinkertaistetusti voiman ja siirtymän välisestä yhtey-

destä luvussa 3.2 esitetyllä periaatteella. Tällöin tasopaalutuksen jäykkyyden osakomponentit eli jousivakiot ratkaistaan edellisessä kappaleessa käsitellylle kuormitustilanteelle pilarin perustusliitoksen tasossa kuvassa 36 esitetysti.

$k_z = F_z/\delta_z =$	1212829	kN/m
$k_x = F_x/\delta_x =$	40129	kN/m
$k_\varphi = M_y/\varphi_y =$	3723530	kNm/rad

Kuva 36. Tasopaalutuksen jousivakiot perustusliitoksessa (CO19).

Ratkaistut vertikaali-, horisontaali- ja rotaatiojousivakiot voidaan syöttää laskentamalliin perustusliitoksen vapausasteiksi. RFEM-ohjelmassa paalutuksen joustavuus pilarin perustusliitoksessa syötetään kuvassa 37 esitetysti.



Kuva 37. Tasopaalutusta vastaavien jousivakioiden määrittely perustustuennalle RFEM-laskentamallissa (CO19).

Kun kehän laskenta on suoritettu ottaen paaluperustuksen jäykkyys huomioon, voidaan paalutuksen jousto määrittää uuden rakennemallin muuttuneiden perustuskuormien mukaiseksi. Näin ollen paalutuksen jäykkyyden määrittämisestä muodostuu iteratiivinen prosessi, jossa paalutuksen jäykkyyden arvoa voidaan tarkentaa joustavan perustuksen aikaansaaman kuormitusten uudelleenjakautumisen seurauksena. Myös paalutuksen opti-

mointi on mahdollista suorittaa, kun tunnetaan joustavien perustusliitosten mukaiset perustuskuormat. Kuitenkin paalutuksen mitoittamisen kannalta ollaan varmallalla puolella, mikäli paalutus lasketaan täysin jäykän perustusliitoksen mukaisille rasituksille. Käytännön suunnittelussa paaluperustuksen jäykkyyden arviointi tarkasti on haastavaa. Esimerkiksi todelliset paalupituudet voivat poiketa suunnittelussa käytetyistä arvoista etenkin haastavissa pohjaolosuhteissa. Tässä työssä tarkastellun paalutuksen jäykkyyden laskentaperiaate ei myöskään huomioi maan edullista vaikutusta paalutuksen kokonaisjäykkyydessä. Muun muassa näistä syistä paalutuksen mitoittaminen joustavana mallinnetun perustuksen keräämille rasituksille sisältää epävarmuutta, mikäli paalutuksen arvioitu joustavuus ei vastaa riittävän tarkasti toteutettavaa paalutusta.

Paalutuksen jousivakioiden iterointi

Tutkitaan paalutuksen joustavuuden vaikutusta perustuskuormille ja näin myös paaluanuran liiketilasta määritetyille jäykkyysskomponenteille. Taulukossa 2 on esitetty kehän tukikohtaisten paalutusten jäykkyyksien iterointi perustusliitosten jouston aiheuttamien rasitusten muutoksen seurauksena. Taulukon kolmella ylimmällä rivillä on esitetty paalutusta rasittavat kuormakomponentit ja kolmella alimmalla rivillä on esitetty näitä vastaavat jousivakiot. Taulukon ensimmäisessä ja neljännessä sarakkeessa on esitetty perustuskohteisesti täysin jäykkänä mallinnetun perustusliitoksen mukaiset perustuskuormat sekä niitä vastaavan siirtymätilan mukaan määritetyt paalutuksen jousivakiot. Toiseen ja viidenteen sarakkeeseen on laskettu iteroinnin ensimmäisen kierroksen mukaiset rasitukset, joiden määrittämiseksi tasokehän FEM-laskentamallin perustusliitoksiin on syötetty ensimmäisen ja neljännen sarakkeen mukaiset jousivakiot. Taulukon kolmannessa ja kuudennessa sarakkeessa on esitetty toisen iterointikierroksen tulokset, joiden määrittämiseksi laskentamallin perustusliitoksissa on käytetty ensimmäisen iterointikierroksen mukaisia jousivakioita. Toisella iterointikierroksella laskettuja jousivakiota ei enää ole hyödynnetty perustuskuormien tarkentamisen määrittämiseen, vaan jäykkyysskomponentit on esitetty vertailuarvoina. Paaluperustuksen jouston seurauksena tarkennettujen perustuskuormien ja vastaavien jousivakioiden tarkentava iterointi on siis päätetty toiseen iterointikierrokseen.

Taulukko 2. Paalutuksien tukikohtaisten rasitusten ja jäykkyyksien iterointi (CO19).

	Vasen perustus			Oikea perustus		
	jäykkä	1. kier.	2. kier.	jäykkä	1. kier.	2. kier.
F_z [kN]	1058,36	1059,59	1059,58	984,18	982,95	982,33
F_x [kN]	120,75	119,35	119,37	91,58	90,28	90,29
M_y [kNm]	489,33	468,95	469,27	480,90	461,13	461,33
k_z [kN/m]	1212829	1212829	1212829	1212829	1212829	1212829
k_x [kN/m]	40129	39784	39790	43824	43346	43352
k_φ [kNm/rad]	3723530	3921581	3918056	2722642	2793905	2793041

Taulukon 2 perusteella kehän perustuskuormitusten havaitaan yleisesti pienenevän paalutuksen joustavuuden seurauksena. Tarkastellussa kuormitusyhdistelmässä paalutuksiin kohdistuvat taivutusmomentit pienenevät kummankin perustuksen osalta n. 4%, kun paaluperustuksen jäykkyys otetaan rakennemallissa huomioon. Sen sijaan perustuksia rasittaville leikkausvoimille paalutuksen joustavuuden aiheuttama muutos tarkastellussa kuormitustapauksessa on n. 1% suuruinen. Perustuksiin kohdistuvissa normaalivoimissa havaitaan vähäinen uudelleen jakautuminen tukien välillä paalutuksien jouston seurauksena, joskin vaikutus on marginaalinen.

Paalutuksen jäykkyyden tarkentamisella kuormitusten muuttumisen suhteen ei havaita olevan merkittävää vaikutusta perustukseen kohdistuvalle rasitukselle. Näin ollen tarkastellussa tilanteessa paalutuksen jäykkyys voidaan määrittää riittävän tarkasti täysin jäykkien perustusliitosten kuormitusten aikaansaamista siirtymätiloista eikä iteroinnilla muutuvien kuormitusten suhteen saavuteta selvää vaikutusta. Tämä voidaan havaita selvimmän perustusta rasittavan taivutusmomentin arvoista taulukossa 2. Tarkastellussa tilanteessa paalutuksen jäykkyyden tarkentaminen ensimmäisellä iterointikierröksellä määritettyjen arvojen mukaiseksi ei vaikuta enää merkittävästi perustuksen rasitukseen.

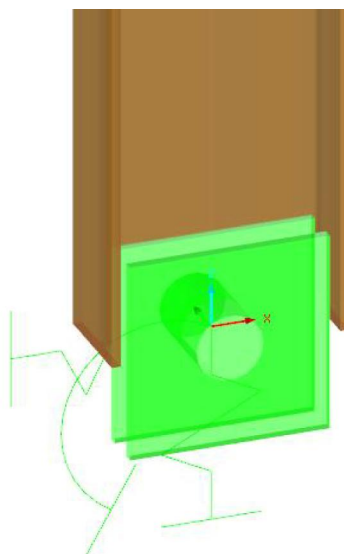
Pystysuuntaisen jäykkyyden k_z havaitaan olevan vastaava molemmilla perustusliitoksilla kuormituksesta riippumatta. Tarkastellun paalutuksen ollessa symmetrinen niin z-, kuin x-akselinkin suhteen vaikuttaa pystykuorma paalutuksen pääjäykkyyssuunnassa. Tällöin pystysuuntainen rasitus saa paalutuksessa aikaan ainoastaan pystysuuntaisen siirtymän, jolloin vastaava jousivakio on suoraan verrannollinen pystykuorman arvoon.

Paalutuksen jäykkyyksien ollessa suoraan verrannollisia paaluanturan siirtymätilaan havaitaan tukikohtaisista paalutuksien horisontaali- ja kiertymäjäykkyyksistä leikkausvoiman ja taivutusmomentin suhteelliset vaikutukset paalutuksen kokonaisjäykkyyteen. Tarkastellussa paalutuksessa taivutusmomentin ja leikkausvoiman kasvattaminen vaikuttavat paaluanturan siirtymätilaan päinvastaisesti. Taivutusmomentti pyrkii aiheuttamaan

paaluanturalle kiertymän vaikutussuunnassa y-akselin ympäri. Sen sijaan paaluanturan yläreunan tasossa vaikuttava leikkausvoima pyrkii kiertämään paaluanturaa taivutusmomenttiin nähden päinvastaiseen suuntaan paalutuksen kiertokeskiön suhteen. Leikkausvoima aiheuttaa myös luonnollisesti paaluanturaan vaakasuuntaisen siirtymän vaikutussuunnassa. Taivutusmomentin vaikutuksesta paaluantura pyrkii siirtymään leikkausvoiman aiheuttamaan vaakasiirtymään nähden päinvastaiseen suuntaan. Näin ollen perustustasossa tarkasteltuna ei paaluanturan vaakasuuntaiselle jäykkyydelle ja kiertymäjäykkyydelle voida määrittää vakiojäykkyyksiä niiden ollessa merkittävästi riippuvaisia perustukseen kohdistuvien leikkausvoiman ja taivutusmomentin suhteesta.

Kuten taulukon 2 perusteella havaitaan, on oikean puoleisen paalutuksen kiertymäjäykkyys selvästi pienempi verraten vasemman puoleiseen perustukseen. Tämä on seurausta suhteellisesti pienemmästä leikkausvoiman arvosta oikean puoleisella tuella. Oikean puoleisessa paalutuksessa leikkausvoima vastustaa vähemmän taivutusmomentin aikaan saamaa kiertymää, jolloin kiertymäjäykkyys muodostuu pienemmäksi kuin vasemman puoleisella tuella. Vastaavasti horisontaalijäykkyys muodostuu oikean puoleisella tuella suuremmaksi kuin vasemman puoleisella paalutuksella pienemmän leikkausvoiman aiheuttaessa maltillisemmän siirtymän eli toisin sanoen taivutusmomentin aiheuttama siirtymä vastustaa oikean puoleisella tuella suhteellisesti enemmän vaakasuuntaista siirtymää kuin vasemman puoleisella tuella.

Mallinnettaessa paalutuksen jäykkyyden vaikutus pilarien perustusliitoksien vapausasteita vastaavina jousivakioina muodostuu rakennemallista paalutuksen todellista toimintaa yksinkertaistava versio. Kuvassa 38 esitetyn kolmen jousen pilarin perustusliitoksen rakennemallissa paalutukseen ei synny perustusliitoksen tasossa vaikuttavan leikkausvoiman vaikutuksesta kiertymää. Vastaavasti perustusliitokseen vaikuttava taivutusmomentti ei saa kolmen jousen yksinkertaistetussa rakennemallissa aikaan sivuttaissiirtymää, vaan kutakin kuormakomponenttia vastustaa niille liitokseen määritelty jousivapaus.

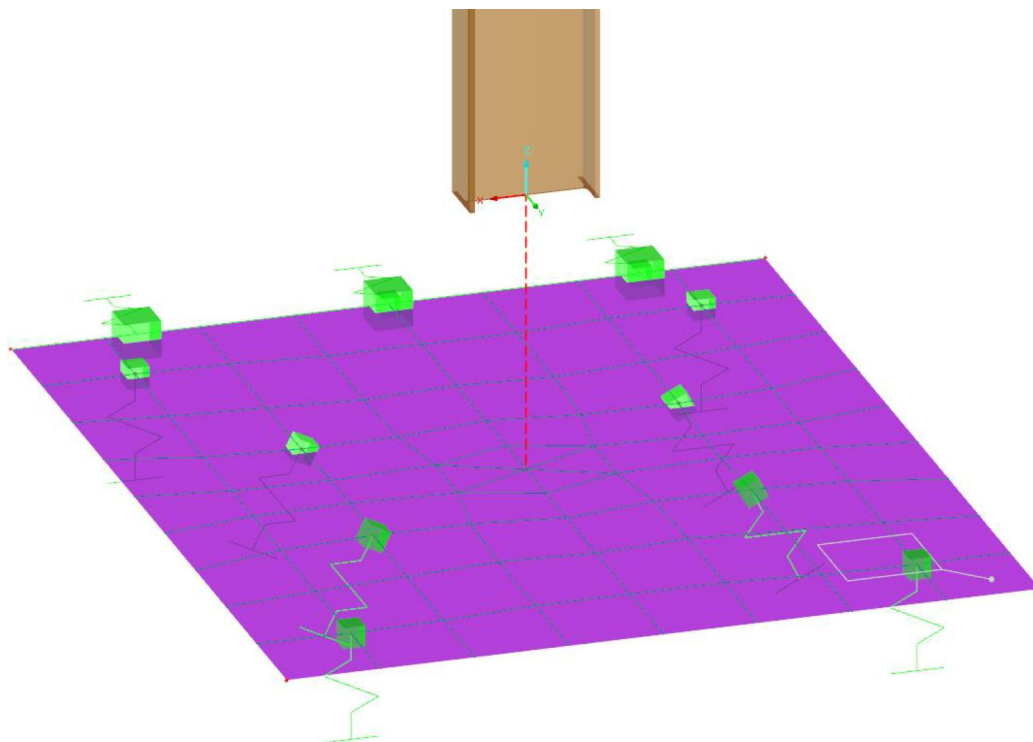


Kuva 38. Paaluperustuksen mallintaminen kolmena jousena pilarin perustusliitoksessa RFEM-laskentaohjelmassa.

Paalutuksen mallintamisen kolmena jousena voidaan todeta olevan käytännön suunnittelun kannalta epäkäytännöllinen tapa, sillä rungon jokaiselle paaluperustukselle tulee tämän metodin mukaan määrittää kuormitusyhdistelmäkohtaisesti erilaiset jousivakiot. Näin ollen tavan havaitaan olevan varsin työläs tarkasteltaessa paalutuksen vaikutusta rungon suunnittelussa. Kuitenkin alustavana paaluperustuksen toimintaa kuvaavana yksinkertaistuksena paalutuksen kuvaaminen kolmena jousena voi olla hyvä tapa yksinkertaisen rungon suunnittelussa.

Paaluryhmän mallinnus kokonaisuutena

Tarkastellaan paaluperustuksen mallintamista kokonaisuudessaan RFEM-laskentaohjelmassa. Rakennemallissa kehän kummankin reunan perustusten paalut mallinnetaan aksiaalijäykkyyttään vastaavina yksittäisinä jousina ja paalut yhdistävä antura mallinnetaan täysin jäykkänä laattana. Rakennemallissa perustukseen kohdistuvien vaakakuormitusten vaikutus hallitaan vinopaaluilla, jolloin maan edullista sivuttaisvastusta ei oteta huomioon niin paalujen kuin anturankaan osalta. Kuvassa 39 on esitetty koko paalutuksen mallinnusperiaate RFEM-laskentamallin pilarin perustusliitoksessa. Pilarin juuri on yhdistetty anturan paksuutta vastaavalla täysin jäykällä ns. rigid-linkillä paalutuksen yläreunan tasoon, jolloin rasitusten jakautuminen saadaan vastaamaan mahdollisimman hyvin todellista tilannetta. Paaluanturan takareunassa on näytetty laskennan reunaehtojen vaatima kehän suuntaan nähden kohtisuoratuenta, joka on mallinnettu hyvin matalan jäykkyyden omaavana jousimaisena viivatukena.



Kuva 39. Paaluperustuksen mallintaminen kokonaisuudessaan ja kytkeminen pilariin RFEM-laskentamallissa.

Paalut voitaisiin mallintaa myös realistisesti teräsbetonisina sauvoina (pilareina). Tällainen mallinnustapa sopii tilanteeseen, jossa paalujen kiinnitysaste kovaan pohjaan halutaan kuvata tarkemmin tai jos maan paaluille aiheuttaman sivuttaistuennan vaikutus halutaan ottaa huomioon. Tässä tutkimuksessa käsitellyt laskentaperiaatteet huomioiden paalujen mallintaminen aksiaalijäykkyytään vastaavina jousina havaitaan kuitenkin sopivaksi mallinnustavaksi.

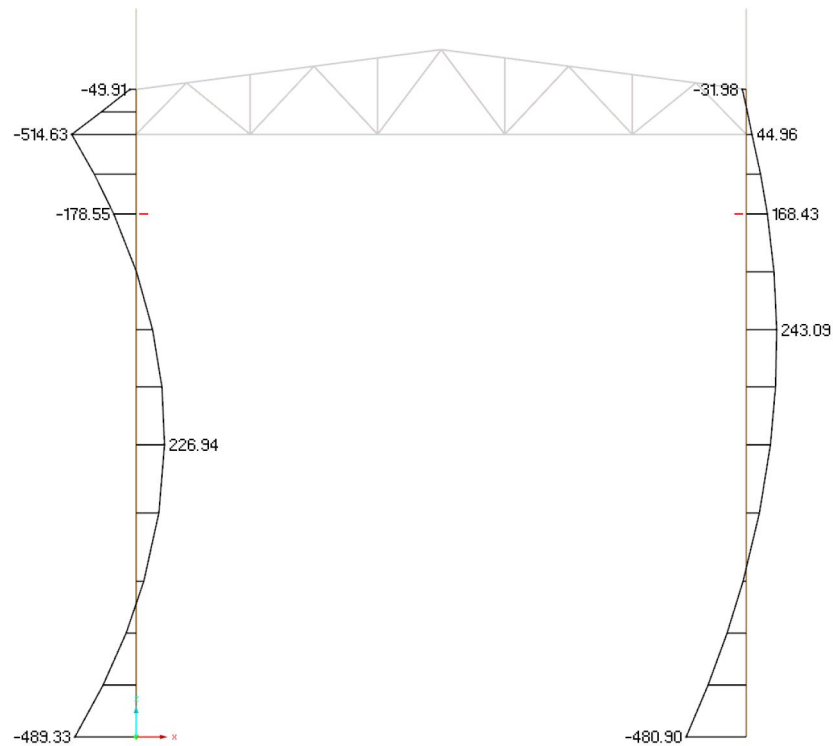
Toisaalta käytännön suunnittelun kannalta paalutuksen yksityiskohtaista mallintamista voidaan pitää myös melko työläänä tapana, mutta tällöin laskentamallissa kuormitusyhdistelmien mukaan vaihtuvien taivutusmomenttien ja leikkausvoimien suhteelliset vaikutukset paaluanturan siirtymätilassa tulee otettua huomioon automaattisesti. Käytännön suunnittelussa paalutuksen yksityiskohtaiseen mallintamiseen on mahdollista kehittää myös algoritmiavusteinen mallinnustapa, jolloin rakennemallin muodostamista voidaan automatisoida.

4.3 Rungon sisäiset rasitukset

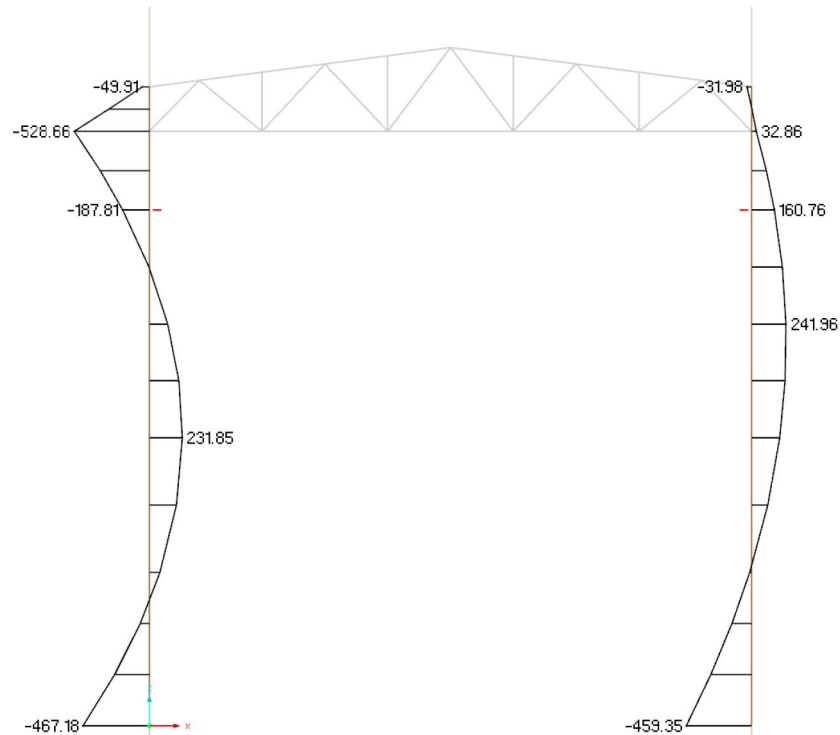
Tarkastellaan paaluperustuksen jäykkyyden vaikutusta rungon sisäisten rasitusten jakautumiselle edellä tarkastellussa tasokehässä kuormitusyhdistelmässä CO19. Suoritetaan kehän rakenneanalyysi aluksi mallintaen perustusliitokset täysin jäykkkinä. Tämän jälkeen tehdään rakenneanalyysi uudestaan mallintaen paaluperustus kokonaisuudessaan lasken-

tamalliin. Lisäksi tässä luvussa suoritetaan vertailua paalutuksen kolmen jousen yksinkertaistavan mallinnuksen suhteen ja tutkitaan parametrisesti paalupituuden ja paalujen välisen etäisyyden vaikutusta rungon sisäisille rasituksille.

Havainnollistetaan rungon rasitusjakauman muutosta rasituskuvaajien avulla tarkasteltaessa kehää perustettuna 20 m syvyyteen ulottuville paaluille. Kuvassa 40 on esitetty tarkastellun kehän taivutusmomenttijakauma, kun perustusliitokset on käsitelty täysin jäykinä. Vastaavasti kuvassa 41 on esitetty kehän taivutusmomenttijakauma, kun paalutuksen joustavuudet on otettu rakennemallissa huomioon.



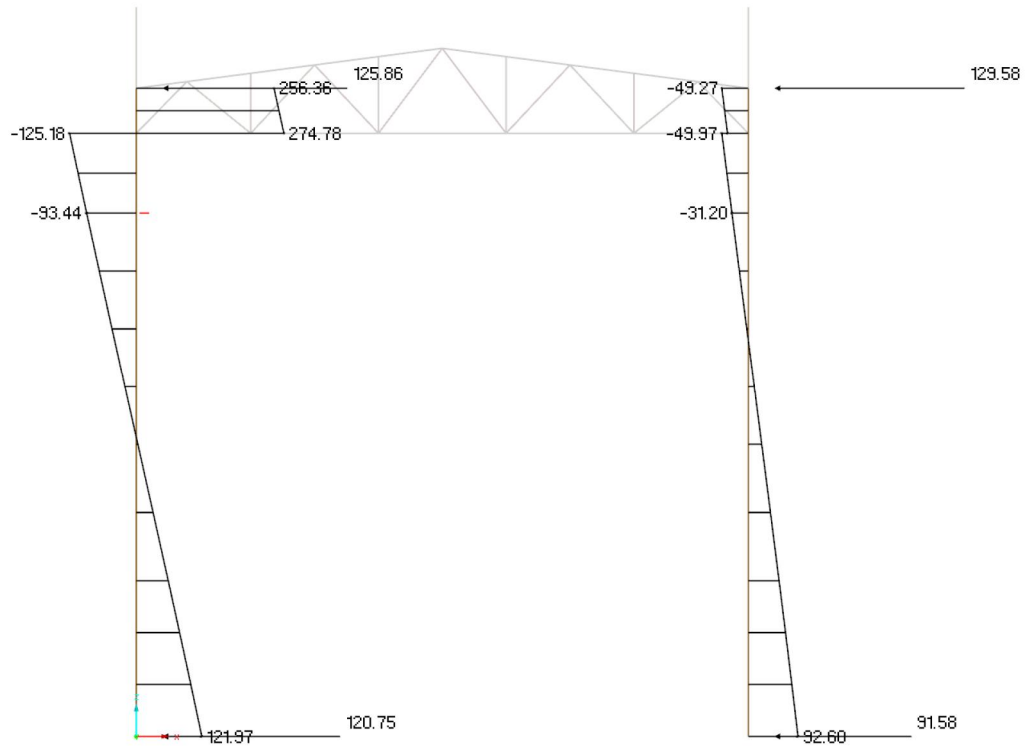
Kuva 40. Kehän taivutusmomenttijakauma [kNm], kun perustusliitokset on mallinnettu täysin jäykinä (CO19).



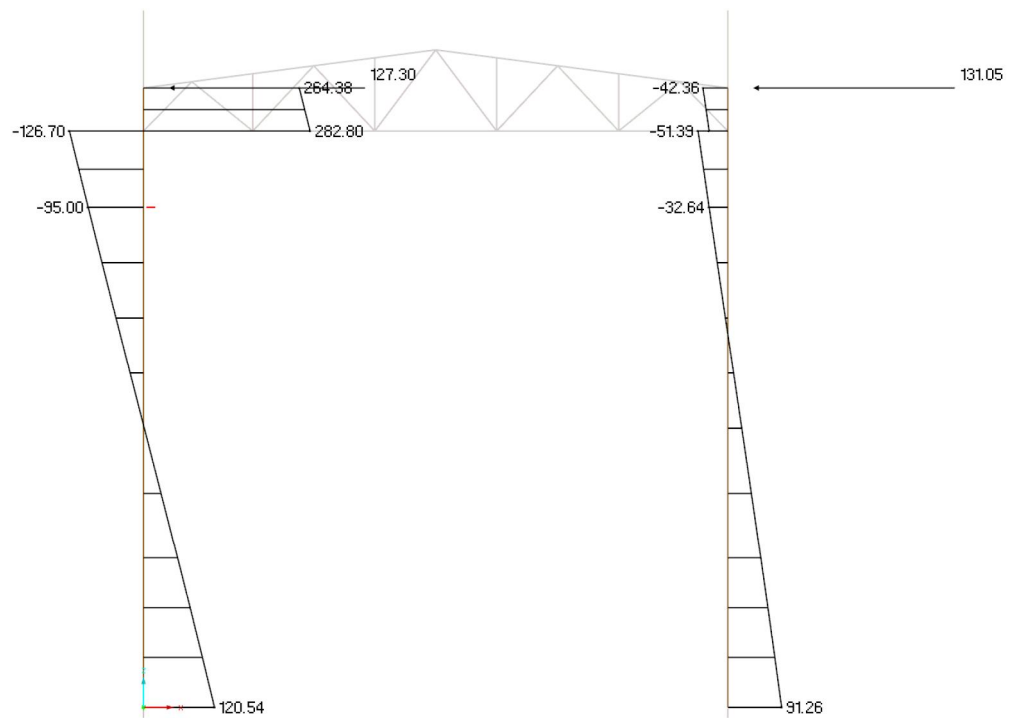
Kuva 41. Kehän taivutusmomenttijakauma [kNm], kun paalutuksen joustavuus on otettu huomioon (CO19, 20 m kovan pohjan syvyys).

Kuvien 40 ja 41 perusteella havaitaan selvästi, kuinka paalutuksen joustavuuden vaikutuksesta rungon rasitusjakauma siirtyy enemmän jäykistävälle kattotasolle. Vasemman puoleisessa pilarissa perustusliitoksen joustavuuden seurauksena juuren taivutusmomentti pienenee ja kenttämomentti sekä jäykälle pilari-ristikko-nurkalle välittyvä taivutusmomentti kasvavat. Oikean puoleisella pilarilla vastaavasti pilarin juuressa paalutuksen joustavuus saa aikaan taivutusmomentin pienenemisen, mutta tarkasteltaessa oikean puolisen pilarin kenttämomenttia sekä jäykän ylänurkan momenttia, havaitaan jäykistävän kattotason rasitusjakaumaa loiventava vaikutus. Ristikon sauvojen taivutusmomenttijakaumia tarkasteltaessa paaluperustuksien joustavuudella ei havaita olevan merkittävää vaikutusta tarkasteltavassa tilanteessa.

Jäykistävän kattotason vaikutus nähdään selvästi kuvissa 42 ja 43, joista ensimmäisessä on esitetty tasokehän leikkausvoimajakauma sekä kehänsuuntaiset tukireaktiot, kun perustusliitos on mallinnettu täysin jäykkänä ja jälkimmäisessä vastaavat rasitukset ja tukireaktiot on esitetty siten, että paalutuksen joustavuus on otettu rakennemallissa huomioon.



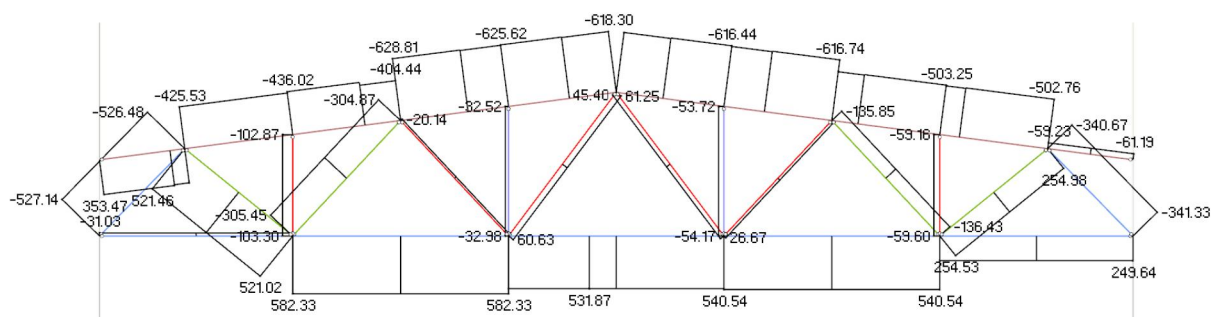
Kuva 42. Kehän leikkausvoimajakauma [kN] ja x -suuntaiset tukireaktiot, kun perustusliitokset on mallinnettu täysin jäykkinä (CO19).



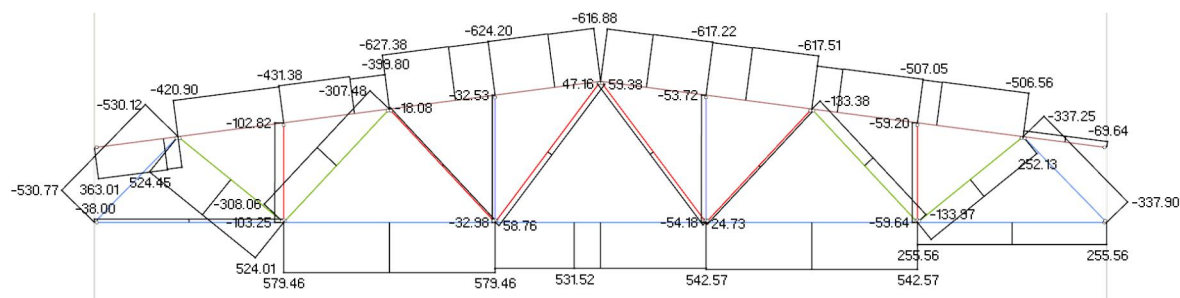
Kuva 43. Kehän leikkausvoimajakauma [kN] ja x -suuntaiset tukireaktiot, kun perustusten joustavuus on otettu huomioon (CO19, 20 m kovan pohjan syvyys).

Kuvien 42 ja 43 leikkausvoimajakaumia tarkasteltaessa havaitaan, ettei paalutuksen jäykkyydellä ole kovin merkittävää vaikutusta pilarien leikkausrasitusten kannalta tarkastellussa tilanteessa. Kuitenkin perustuksen joustavuudesta aiheutuva ilmiö on havaittavissa, sillä leikkausrasitus jakaantuu voimakkaammin kehän jäykille ylänurkille paalutuksen joustavuuden seurauksena. Samoin jäykistävä kattotaso kerää suuremman rasituksen perustusliitoksen joustavuuden myötä. Ristikön sauvojen leikkausrasituksille paalutuksen joustavuudella ei havaita olevan merkittävää vaikutusta.

Tarkastellaan paalutuksen joustavuuden vaikutusta ristikon sauvavoimille. Kuvassa 44 on esitetty ristikon normaalivoimajakautus, kun perustusliitokset on mallinnettu täysin jäykkänä. Kuvassa 45 on esitetty vastaavat rasitukset, kun perustusliitoksien joustavuudet on otettu huomioon.



Kuva 44. Ristikön normaalivoimajakauma [kN], kun perustusliitokset on mallinnettu täysin jäykkänä (CO19).



Kuva 45. Ristikön normaalivoimajakauma [kN], kun perustusliitosten joustavuus on otettu huomioon (CO19, 20 m kovan pohjan syvyys).

Kuvien 44 ja 45 perusteella havaitaan paaluperustuksen joustolla olevan merkittävin vaikutus ristikon ja pilarien nurkkaliitoksen sauvojen normaalivoimajakaumalle ja tarkasteltaessa ristikon keskikohdan sauvoja muodostuu paalutuksen jäykkyyden vaikutukset vähemmän merkityksellisiksi. Rasitustilan siirtyessä enemmän kehän kattotasolle paaluperustuksen joustavuuden seurauksena havaitaan jäykät nurkat muodostavien ristikon ylä- ja alapaarteiden rasitusten kasvavan ristikon molemmilla reunoilla. Tarkastellussa tilan-

teessa kehän vasemman puoleisella jäykällä nurkalla havaitaan ristikon yläpaarteen vetorasituksen kasvavan ja alapaarteen puristusrasituksen vastaavasti myös suurenevan perustuksien joustavuuden seurauksena. Samoin vasemman nurkan puristusdiagonaalin rasituksen havaitaan kasvavan paalutuksen joustavuuden seurauksena. Vastaavasti oikean puoleisella nurkalla yläpaarteen reunimmaisen solmuvälin puristusrasitus kasvaa ja vastaavasti alapaarteen vetorasitus suurenee, kun paalutuksien jäykkyys otetaan huomioon. Tällöin oikean nurkan puristusdiagonaalin rasituksen havaitaan pienenevän. Vaikka paarteiden reunimmaisten solmuvälien rasitustilojen muutos on verrattain suuri, eivät nämä ole mitoittavia poikkileikkauksen kohtia koko paarteen kannalta. Näin ollen perustuksen joustavuudella voidaan todeta olevan tarkastellussa tilanteessa verrattain vähäinen vaikutus ristikon mitoituksen kannalta.

Tarkastellulla paalutuksella kehän pilarien perustusliitoksen tason maksimitaivutusmomenttien havaitaan pienenevän n. 4% ja vastaavasti maksitaivutusmomenttien havaitaan kasvavan pilarien yläpäässä ristikon alapaarteen tasolla n. 2%, kun paalutuksen jäykkyys otetaan rakennemallissa huomioon. Sen sijaan pilarien maksimileikkausvoimissa tarkastellun paalutuksen joustavuus saa aikaan perustusliitoksen tasolla n. 1% suuruisen pienemisen ja vastaavasti pilarien yläpäässä maksileikkausvoiman arvo kasvaa paalutuksien joustavuuksien seurauksena kehän vasemmalla puolella n. 2% ja oikealla puolella n. 3%. Ristikon sauvojen maksiminormaalivoimia tarkasteltaessa havaitaan paalutuksen joustavuuden suurin suhteellinen muutos kehän vasemman puoleisen pilarin ja ristikon liitoksen yläpaarteessa, jossa vetorasitus kasvaa n. 2%. Vastaavasti kehän oikean puoleisessa pilari-ristikko-liitoksessa suurin suhteellinen muutos havaitaan yläpaarteessa, jossa paalutuksen joustavuuden seurauksena maksimivetorasitus kasvaa n. 3%. Tarkastellun paalutuksen tapauksessa jäykistävän kattotason maksimitukireaktioiden havaitaan kasvavan n. 1%, kun paalutuksen jäykkyys otetaan rakennemallissa huomioon.

4.3.1 Paalutuksen mallinnustapojen vertailu

Tarkastellaan luvussa 4.2 esitettyjen paalutuksen mallinnustapojen eroavaisuuksia rungon taivutusmomenttijakaumalle. Taulukossa 3 on esitetty kehän pilarien taivutusmomentit perustusliitoksen tasossa sekä pilarien yläpäässä ristikon alapaarteen tasossa kuormitusyhdistelmässä CO19. Sulkeissa esitetyt arvot kuvaavat suhteellista eroa täysin jäykkien perustusliitosten mallin mukaisesti rasituksiin. Kolmen jousen yksinkertaistavassa paalutuksen mallinnustavassa on käytetty perustuskohtaisesti jäykkien liitosten kuormituksia vastaavia jousivakioiden arvoja, jotka on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 3. Paalutuksen mallinnustapojen vertailu kehän taivutusmomenttijakaumassa suhteessa täysin jäykkään perustusliitokseen (CO19).

Perustusliitoksen rakennemalli	Vasen pilari, taivutusmomentit [kNm]		Oikea pilari, taivutusmomentit [kNm]	
	Perustusliitoksessa	Ristikon alapaarteen tasossa	Perustusliitoksessa	Ristikon alapaarteen tasossa
Täysin jäykkä (teoreettinen)	-489,33	-514,63	-480,9	44,96
Paalutuksen kokonaismallinnus	-467,18 (4,5%)	-528,66 (2,7%)	-459,35 (4,7%)	32,86 (36,8%)
Kolmen jousen paalutus	-468,95 (4,3%)	-527,85 (2,6%)	-461,13 (4,3%)	33,64 (33,7%)

Taulukon 3 perusteella havaitaan, että paalutuksen eri mallinnustapojen välinen ero muodostuvissa taivutusmomenteissa on hyvin vähäinen. Paalutuksen toimintaa yksinkertaistavan kolmen jousen perustusliitoksen rakennemallin mukaan kehän perustusliitokset keräävät n. 1,8 kNm suuremman taivutusmomentin verraten rasiin, jotka on saatu mallintaen paalutus kokonaisuudessaan laskentamalliin. Vastaavasti kehän jäykkien pilariristikko-nurkkien taivutusmomentteja tarkasteltaessa havaitaan arvojen eroavan n. 0,8 kNm. Taulukon 3 mukaan kolmen jousen yksinkertaistavassa mallinnustavassa paalutuksen jäykkyydestä tulee siis hieman suurempi tarkastellussa tapauksessa, kuin mallinnettaessa paalutus kokonaisuudessaan. Kuitenkin havaittu ero on hyvin vähäinen, joten tarkastellussa tilanteessa paalutuksen toimintaa yksinkertaistavan kolmen jousen rakennemallin voidaan todeta vastaavan suhteellisen hyvin paalutuksen toimintaa.

4.3.2 Paalupituuden vaikutus

Tarkastellaan kovan pohjan syvyyden vaikutusta kehän pilarien maksimitaivutusmomenttien arvoille. Tarkastelussa käytetään kuvan 28 mukaista paalutusta ja vertailu suoritetaan RFEM-laskentamallilla, jossa paalutus on mallinnettu kokonaisuudessaan. Paalutuksen jäykkyyttä varioidaan muuttamalla paalujen tunkeutumistasoa 5 m – 40 m assteittain viidellä metrillä. Taulukossa 4 on esitetty kehän pilarien suurimpien taivutusmomenttien arvot suhteessa paalujen pituuden mukaan määritettyyn kiertymäjäykkyyteen kiertoakeskiön suhteen. Kovan pohjan syvyys on määritelty anturan alapinnasta. Taulukossa on esitetty vertailuarvona myös täysin jäykkien perustusliitosten laskentamallin mukaiset maksimitaivutusmomentit.

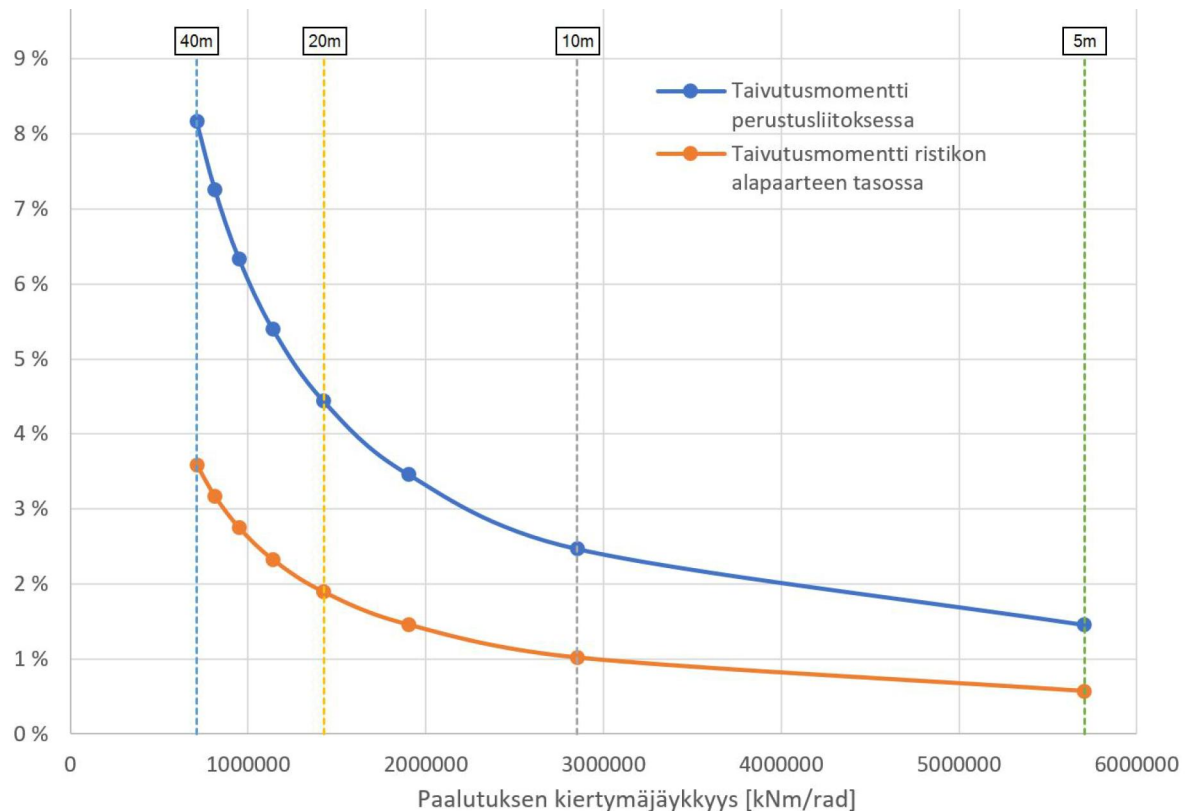
Taulukko 4. Kovan pohjan syvyyden (paalupituuden) vaikutus kehän maksimitaivutusmomenteille.

Kovan pohjan syvyys [m]	Paalutuksen kiertymäjäykkyys [kNm/rad]	Vasen pilari, maks. taiv.mom. [kNm]		Oikea pilari, maks. taiv.mom. [kNm]	
		Perustusliitos	Ristikön alapaarteen taso	Perustusliitos	Ristikön alapaarteen taso
-	täysin jäykkä	659,3	-680,35	-678,57	591,97
5	5705715	649,71	-684,24	-668,73	596,44
10	2852857	643,03	-687,28	-661,9	599,94
15	1901905	636,47	-690,27	-655,2	603,4
20	1426429	630,04	-693,23	-648,63	606,82
25	1141143	623,72	-696,16	-642,19	610,2
30	950952	617,53	-699,06	-635,87	613,54
35	815102	611,44	-701,92	-629,66	616,85
40	713214	605,47	-704,76	-623,57	620,12

Yksittäisen tukipaalun aksiaalinen jousivakio määritetään luvun 2.2.3 mukaan paalupoikileikkauksen aksiaalijäykkyyden ja paalupituuden suhteesta. Näin ollen tukipaalutuksen jäykkyys on suoraan verrannollinen käytettyyn paalutyyppiin sekä rakennuspaikan kovan pohjan syvyyteen. Paalutyypin säilyessä samana voidaan paalupituuden vaikutusta arvioida paalutuksen jäykkyydelle. Taulukon 4 perusteella paalujen tunkeumasyvyyden kaksinkertaistaminen johtaa paalutuksen jäykkyyden puolittumiseen. Tarkasteltujen paalutuksien joustavuuden seurauksena pilarien perustusliitosten taivutusmomenttien havaitaan pienenevän n. 1-8% sekä pilarien yläpäiden ristikon alapaarteen tasossa vaikuttavien taivutusmomenttien havaitaan kasvavan n. 1-5% verrattuna täysin jäykkien perustusliitosten rakennemalliin. Kovan pohjan syvyyden kasvattamisen viidellä metrillä havaitaan pienentävän kehän perustusliitosten keräämien taivutusmomenttien arvoja n. 1% ja vastaavasti kasvattavan ristikon alapaarteen tasossa vaikuttavia pilarien taivutusmomentteja n. 0,4 - 0,6% tarkastellulla rungolla.

Taulukon 4 perusteella havaitaan selvästi paalutuksen jäykkyyden aiheuttama rungon taivutusmomenttijakauman muutos. Paalutuksen joustavuuden seurauksena pilarien perustusliitoksen taivutusmomentit pienenevät ja vastaavasti pilarien ja ristikon muodostamissa jäykissä nurkissa vaikuttavien taivutusmomenttien havaitaan kasvavan. Suhteellisten muutosten havaitaan olevan lähes vastaavat kehän kummallakin puolella verraten täysin jäykkien perustusliitosten laskentamallin taivutusmomenttien arvoihin. Kuvassa 46 on esitetty kehän vasemman puoleisen pilarin maksimitaivutusmomenttien suhteellinen

muutos verraten täysin jäykkien perustusliitosten rakennemallin mukaisiin rasituksiin kovan pohjan syvyyden mukaan johdetun kiertymäjäykkyyden funktiona. Kuvaajan pystyviivoilla on esitetty kovan pohjan syvyyden väliarvoja.



Kuva 46. Paalutuksen tunkeumasyvyyden vaikutus kehän vasemman puoleisen pilarin maksimitaivutusmomenteille.

Kuvan 46 perusteella paalutuksen joustavuuden suhteellinen vaikutus havaitaan suuremmaksi perustusliitoksessa vaikuttavassa taivutusmomentissa verraten jäykän pilari-ristikko-liitoksen taivutusmomenttiin. Kuvaajan perusteella havaitaan myös paalutuksen jäykkyyden epälineaarinen vaikutus pilarin taivutusmomenttien arvoissa. Tarkastellussa tilanteessa joustavammalla paalutuksella jäykkyyden muuttumisen vaikutus pilarin taivutusmomenttijakaumalle on verrattain suurempi kuin jäykemmällä paalutuksella. Verrattaessa paalujen tunkeumasyvyyden muutosta 5 m – 15 m pienenee paalutuksen kiertymäjäykkyys kiertokeskiön suhteen n. 3800000 kNm/rad, jolloin pilarin taivutusmomentin arvo ristikon alapaarteen tasossa kasvaa n. 0,9% ja pienenee perustusliitoksessa n. 2%. Sen sijaan tarkasteltaessa paalujen tunkeumasyvyyksien arvoja 15 m – 40 m, havaitaan paalutuksen kiertymäjäykkyyden pienenevän n. 1200000 kNm/rad, jolloin pilarin taivutusmomentin arvo ristikon alapaarteen tasossa kasvaa n. 2,1% ja pienenee perustusliitoksessa n. 4,9%.

4.3.3 Paalujen välisen etäisyyden vaikutus

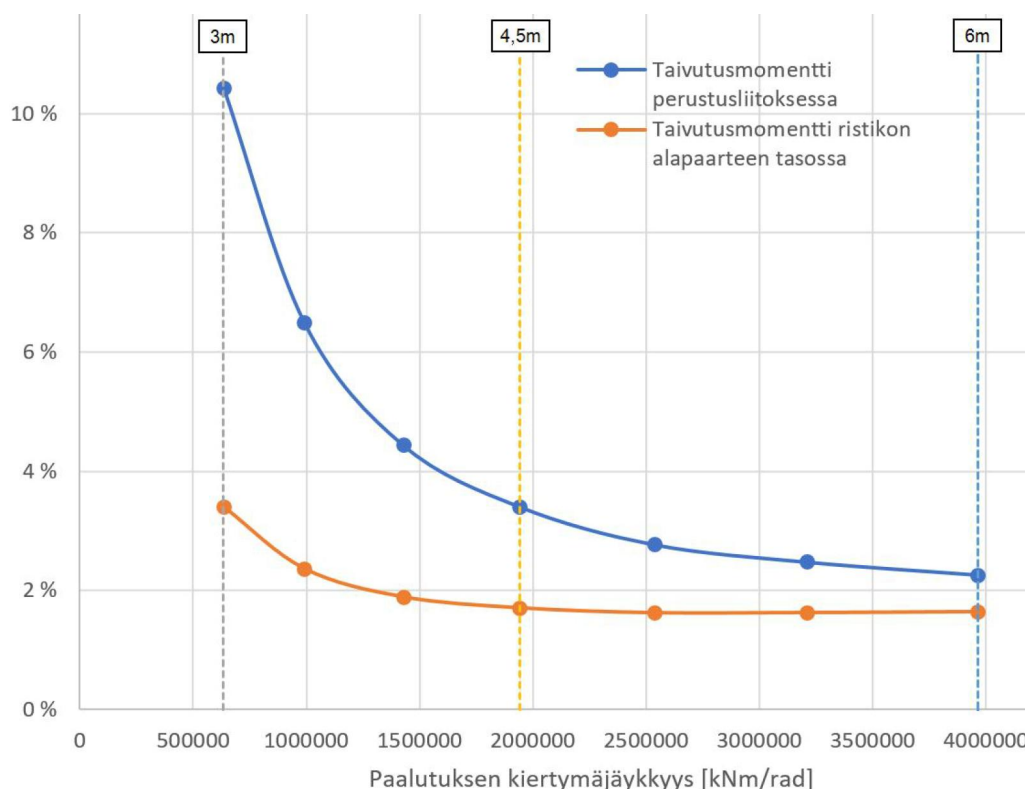
Tarkastellaan paaluanturan leventämisen vaikutusta kehän pilarien taivutusmomenttija-kaumalle. Tutkittu paaluantura ja paalutus on kuvan 28 mukainen, jolloin kovan pohjan syvyyden arvoina käytetään tarkastelussa 20 m. Paalutuksen joustavuutta varioidaan kuormituksen suunnassa anturan leveyttä muuttamalla 3 m – 6 m asteittain puolen metrin välein. Kun paalujen etäisyys säilytetään anturan ulkoreunasta samana, muuttuu myös vastakkaisten pysty- ja vinopaalurivien välinen etäisyys anturan leveyden suhteessa portaittain puolella metrillä. Taulukossa 5 on esitetty kehän pilarien maksimitaivutusmomenttien muutos suhteessa anturan leveyden mukaan määritettyyn paalutuksen jäykkyyteen. Taulukossa on myös esitetty vertailuarvona täysin jäykkien perustusliitosten rakennemallin mukaiset pilarien maksimitaivutusmomenttien arvot. Vertailu suoritetaan parametrisesti RFEM-laskentamallilla, jossa ainoastaan anturan leveyttä (paalurivien välistä etäisyyttä) muutetaan kuormituksen suunnassa tarkastellen runkoon muodostuvia maksimitaivutusmomenttien arvoja, jolloin vaikutuksia syntyviin paalukuormiin tai paaluanturan mitoittamiseen ei tarkastella tässä yhteydessä.

Taulukko 5. Paaluanturan leveyden vaikutus kehän maksimitaivutusmomenteille.

Paalu- anturan leveys	Paalutuksen kiertymäjäyk- kyys [kNm/rad]	Vasen pilari, maks. taiv.mom. [kNm]		Oikea pilari, maks. taiv.mom. [kNm]	
		Perustus- liitos	Ristikon ala- paarteen taso	Perus- tusliitos	Ristikon ala- paarteen taso
-	täysin jäykkä	659,30	-680,35	-678,57	591,97
3	633968	590,52	-703,54	-607,33	618,20
3,5	990575	616,49	-696,46	-634,46	610,41
4	1426429	630,04	-693,23	-648,63	606,82
4,5	1941528	636,87	-691,97	-655,79	605,38
5	2535873	641,05	-691,41	-660,17	604,73
5,5	3209465	642,97	-691,43	-662,19	604,72
6	3962302	644,39	-691,53	-663,68	604,80

Taulukon 5 perusteella havaitaan paaluanturan leventämisen paalutuksen jäykkyyttä lisäävä vaikutus. Paaluanturan leventämisen seurauksena kuormitukseen nähden vastakkaisten paalurivien välinen etäisyys kasvaa, jolloin paalutuksesta muodostuu kiertymän suhteen jäykempi. Paalutuksen jäykkyyden kasvaessa paalujen välistä etäisyyttä leventämällä havaitaan perustusliitosten keräävän suuremman taivutusmomentin, jolloin vastavasti pilari-ristikko-nurkkien taivutusmomenttien havaitaan pienenevän. Tarkastelluilla paalutuksilla perustusliitoksessa vaikuttavan taivutusmomentin havaitaan pienenevän n.

2-10% ja pilarin yläpäässä ristikon alapaarteen tasolla vaikuttavan taivutusmomentin havaitaan pienenevän n. 2-4%. Kuvassa 47 on esitetty kehän vasemman puoleisen pilarin maksimitaivutusmomenttien suhteellinen muutos täysin jäykkien perustusliitosten rakennemallin mukaisiin rasituksiin verraten paalutuksen leveyden mukaan kiertokeskiön suhteen määritetyn kiertymäjäykkyyden funktiona. Kuvaajan pystyviivoilla on esitetty paaluanturan leveyden väliarvoja.



Kuva 47. Paalutuksen leveyden vaikutus kehän vasemman puoleisen pilarin maksimitaivutusmomenteille.

Kuvan 47 perusteella havaitaan paalutuksen leventämisen epälineaarinen vaikutus pilariin muodostuville taivutusmomenteille. Paalutuksen leventäminen saa aikaan suhteellisesti suuremman muutoksen verrattain joustavammilla paalutuksilla, jolloin paalurivien välisen etäisyyden kasvattamisen seurauksena paalutuksen jäykkyys kasvaa suhteellisesti enemmän kuin jäykemmillä paalutuksilla. Tarkastellussa tilanteessa paaluanturan leventämisen arvosta 3 m arvoon 4,5 m havaitaan kasvattavan paalutuksen kiertymäjäykkyyttä n. 1 300 000 kNm/rad, jolloin pilarin taivutusmomentin arvo perustusliitoksessa kasvaa n. 7,8% ja vastaavasti pilarin yläpäässä ristikon alapaarteen tasossa taivutusmomentin arvo pienenee n. 1,6%. Sen sijaan tarkasteltaessa paaluanturan leventämistä arvosta 4,5 m arvoon 6 m, havaitaan paalutuksen kiertymäjoustavuuden kasvavan n. 2 000 000 kNm/rad, jolloin taivutusmomentti pilarin perustusliitoksessa kasvaa n. 1,2% ja ristikon alapaarteen tasossa pilarissa vaikuttava taivutusmomentti pienenee n. 0,1%.

Tarkasteltaessa paalutuksen kiertymäjäykkyyttä, johtaa paalutuksen leventäminen lopulta perustusliitoksessa vaikuttavien taivutusmomenttien pienemiseen. Kuvaajan 47 mukaan havaitaan, kuinka paalutuksen kiertymäjäykkyyden kasvaminen lisää perustusliitoksessa vaikuttavaa taivutusmomenttia. Tämä on seurausta paalutuksen kiertymäjäykkyyden kasvamisen perusteella pienentyvästä paaluanturan kiertymästä. Mitä pienemmäksi perustuksen kiertymä muodostuu, sitä jäykempi perustus on, jolloin perustus kerää suuremman taivutusmomentin. Kuitenkin levennettäessä paalutusta riittävästi saavutetaan tila, jossa taivutusmomentin aiheuttama kiertymä pienenee hyvin vähäiseksi, jolloin perustusliitoksessa vaikutta leikkausvoiman aiheuttama taivutusmomenttiin nähden vastakkaissuuntainen kiertymä tulee määrääväksi. Tällöin perustuksen kiertymäjäykkyys pienenee, jolloin perustuksen keräämä taivutusmomentti pienenee yhtä lailla. Ilmiö on vastaava, joka havaittiin luvussa 4.2.2 tarkasteltaessa perustusliitoksen tasossa määritettyjä paalutuksen yksinkertaistettuja jousivakioita.

4.4 Rungon stabiliteetti

Tarkastellaan paalutuksen joustavuuden vaikutusta pääkehän pilarien stabiliteetille. Alkuperäiseltä rakennemalliltaan kehän pilarit ovat alapäästään jäykästi tuettuja niin kiertymän kuin vaakasuuntaisen tuennankin suhteen. Yläpäästään pilarien liitos ristikkoon käsitellään momenttijäykkänä sekä kattotason vaakasuuntainen jäykistys otetaan huomioon pilarin yläpäässä luvussa 4.1 esitetysti translaatiojousena.

Kattotason jäykkyyden havaitaan olevan niin suuri, ettei sillä ole merkittävää vaikutusta pilarin nurjahduspituudelle. Tällöin alkuperäiseltä rakennemalliltaan pilarin nurjahduspituus vastaa jäykästi ylä- ja alapäästään kiinnitettyä sivusiirtymätöntä sauvaa, jonka nurjahduspituus on $0,5L$, missä L on pilarin pituus (Salmi & Pajunen, 2010, s. 280). Tarkastellulle pilarille nurjahduspituus on siis tämän rakennemallin mukaisesti 12,6 m.

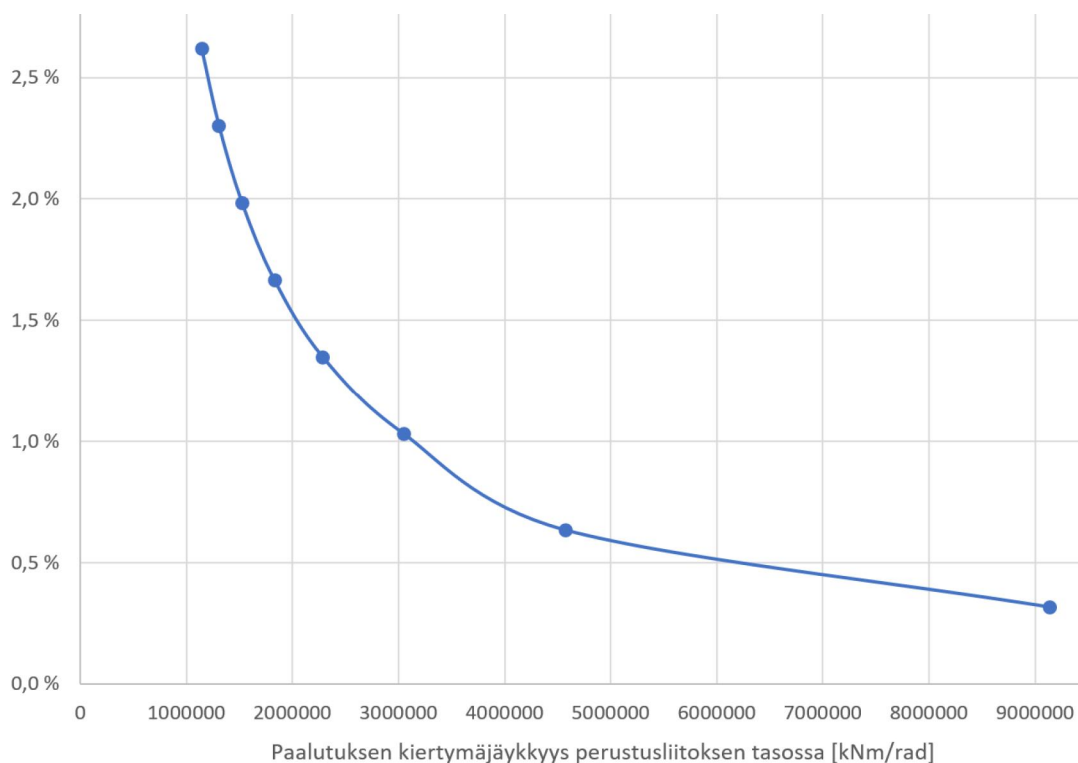
Kun paaluperustuksen jäykkyys otetaan tarkastelussa huomioon, korvataan pilarin alapään täysin jäykkätuenta paalutuksen jäykkyyttä vastaavilla jousivakioilla. Tarkastellaan paalutuksen jäykkyyden vaikutusta pilarin nurjahduspituudelle muuttaen kovan pohjan syvyyttä vastaavasti kuin luvussa 4.3.2. Määrävin pystykuorma vallitsee kuormitusyhdistelmässä CO6 tasokehän vasemman puoleisella pilarilla. Tarkastellaan pilarin nurjahduspituutta tässä kuormitustilanteessa, jolloin paalutuksen horisontaali- ja kiertymäjousivakiot määritetään luvussa 4.2.2 esitetyllä periaatteella paaluanturan siirtymätilasta. Pilarin nurjahdustarkastelu suoritetaan käyttäen PTC Mathcad Prime 4.0 -ohjelmaa. Liitteessä A on esitetty tässä tarkastelussa käytetty luvun 3.3 mukainen laskentaperiaate.

Taulukossa 6 on esitetty kehän vasemman puoleiselle pilarille määritetyt nurjahduspituudet suhteessa kovan pohjan syvyyden mukaan lasketuille perustusliitoksen tasoa vastaaville paalutuksen jäykkyyksille.

Taulukko 6. Paalutuksen jäykkyyden vaikutus kehän vasemman puoleisen pilarin nurjahduspituudelle (CO6).

Kovan pohjan syvyys [m]	Paalutuksen jäykkyydet perustusliitoksen tasossa		Pilarin nurjahduspituus [m]
	Kiertymäjäykkyys [kNm/rad]	Horisontaalijäykkyys [kN/m]	
-	täysin jäykkä	täysin jäykkä	12,60
5	9137646	196503	12,64
10	4568823	98251	12,68
15	3045882	65501	12,73
20	2284411	49126	12,77
25	1827529	39301	12,81
30	1522941	32750	12,85
35	1305378	28072	12,89
40	1142206	24563	12,93

Taulukon 6 perusteella havaitaan paalutuksen jäykkyyden pienenemisen seurauksena pilarin nurjahduspituuden kasvavan. Tarkasteltujen paalutuksien joustavuuden seurauksena pilarin nurjahduspituuden havaitaan kasvavan n. 1-3% verraten täysin jäykkään perustusliitokseen. Pilarin nurjahduspituuden muutos suhteessa täysin jäykän perustusliitoksen mukaiseen arvoon paalutuksen perustusliitoksen tasossa määritetyn kiertymäjäykkyyden funktiona on esitetty kuvassa 48.

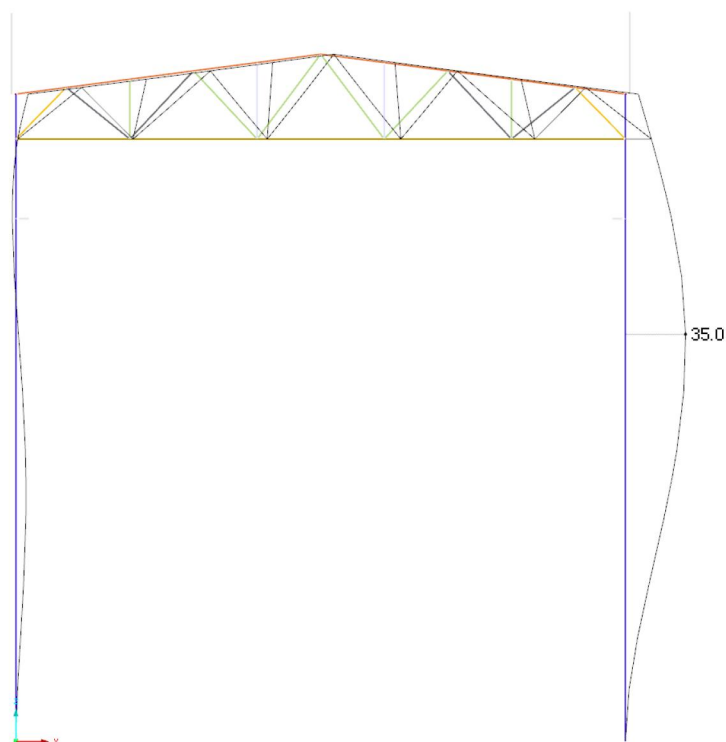


Kuva 48. Paalutuksen jäykkyyden vaikutus kehän vasemman puoleisen pilarin nurjahduspituudelle suhteessa täysin jäykkään perustusliitokseen (CO6).

Kuvan 48 mukaan havaitaan paalutuksen jäykkyyden epälineaarinen vaikutus pilarin nurjahduspituudelle. Verrattain joustavammalla paalutuksella suhteellinen muutos pilarin nurjahduspituudelle on suurempi kuin jäykemmällä paalutuksella. Tarkasteltaessa paalujen tunkeumasyvyyden muutosta arvosta 5 m arvoon 15 m pienenee paalutuksen kiertymäjäykkyys perustusliitoksen suhteen n. 6100000 kNm/rad, jolloin pilarin nurjahduspituus kasvaa n. 0,7%. Sen sijaan tarkasteltaessa paalujen tunkeumasyvyyksien arvoja 15 m – 40 m, havaitaan paalutuksen kiertymäjäykkyyden pienenevän n. 1900000 kNm/rad, jolloin pilarin nurjahduspituus kasvaa n. 1,6%.

4.5 Rungon siirtymä

Tarkastellaan paalutuksen jäykkyyden vaikutusta rungon vaakasiirtymälle. Suoritetaan rungon siirtymäanalyysi edellä esitetyllä periaatteella mallintaen kuvassa 28 esitetty paalutus RFEM-laskentamalliin kokonaisuudessaan kytkettynä kehän pilarien perustusliitokseen. Paalutuksen jäykkyyttä varioidaan kovan pohjan syvyyttä muuttamalla. Tarkastellulla tasokehällä vaakasuuntaisen siirtymän maksimiarvo syntyy kehän oikean puoleiselle pilarille rungon sivuttaissiirtymän sekä pilarin taipuman yhteisvaikutuksesta. Tällöin siirtymä on täysin jäykkien perustusliitosten rakennemallissa kuvan 49 mukaisesti 35mm.



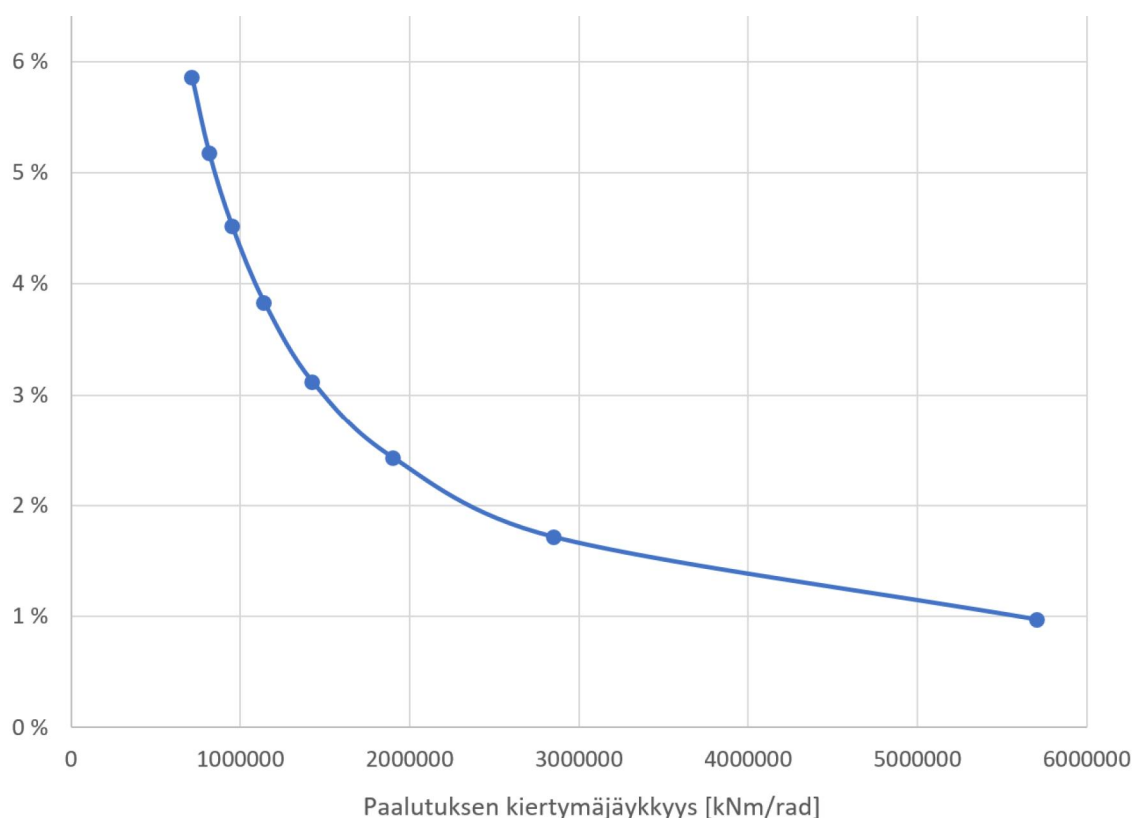
Kuva 49. Tasokehän vaakasuuntainen siirtymä [mm] täysin jäykkien perustusliitosten mukaiselle rakennemallille (CO35).

Tutkitaan paalutuksen joustavuuden vaikutusta kehän siirtymille muuttaen paalujen aksiaalijäykkyyksiä laskentamallissa muuttuvan kovan pohjan syvyyden perusteella. Taulukossa 7 on esitetty kehän vaakasuuntaisen siirtymän maksimiarvot paalujen tunkeumasyvyyden perusteella kiertokeskiön suhteen määritetyn kiertymäjäykkyyden suhteessa.

Taulukko 7. Paalutuksen jäykkyyden vaikutus kehän sivuttaissiirtymälle (CO35).

Kovan pohjan syvyys [m]	Paalutuksen kiertymäjäykkyys [kNm/rad]	Rungon vaakasuuntainen siirtymä [mm]
-	täysin jäykkä	35,00
5	5705715	35,34
10	2852857	35,60
15	1901905	35,85
20	1426429	36,09
25	1141143	36,34
30	950952	36,58
35	815102	36,81
40	713214	37,05

Taulukon 7 perusteella havaitaan paalutuksen joustavuuden rungon siirtymää kasvattava vaikutus. Paalutukseen syntyvien kiertymän ja vaakasuuntaisen siirtymän seurauksena runkoon muodostuu täysin jäykkään perustusliitokseen verrattuna suurempi vaakasuuntainen siirtymä. Tarkastelluilla paalutuksilla kehän vaakasuuntainen siirtymä kasvaa n. 1-6%, kun paalutuksen joustavuus otetaan rakennemallissa huomioon verrattuna täysin jäykkien perustusliitosten mukaiseen rakennemalliin. Kuvassa 50 on esitetty kehän vaakasuuntaisen siirtymän suhteellinen muutos verraten täysin jäykkien perustusliitosten laskentamallin mukaiseen arvoon kovan pohjan syvyyden mukaan määritetyn paaluryhmän kiertymäjäykkyyden funktiona.



Kuva 50. Tasokehän vaakasuuntaisen siirtymän suhteellinen muutos täysin jäykän perustusliitoksen rakennemalliin verraten paalutuksen kiertymäjäykkyyden funktiona (CO35).

Kuvan 50 perusteella paalutuksen jäykkyyden muutoksella havaitaan olevan rungon vaakasuuntaiselle siirtymälle epälineaarinen vaikutus. Mitä jäykemmäksi paalutus muodostuu sitä pienempi suhteellinen muutos vaakasiirtymässä, tapahtuu muutettaessa paalutuksen jäykkyyttä. Tarkasteltaessa paalujen tunkeumasyvyyden muutosta arvosta 5 m arvoon 15 m pienenee paalutuksen kiertymäjäykkyys n. 3800000 kNm/rad, jolloin kehän vaakasuuntainen siirtymä kasvaa n. 1,4%. Sen sijaan tarkasteltaessa paalujen tunkeumasyvyyksien arvoja 15 m – 40 m, havaitaan paalutuksen kiertymäjäykkyyden pienenevän n. 1200000 kNm/rad, jolloin kehän vaakasuuntainen siirtymä kasvaa n. 3,3%.

5. YHTEENVETO

Rakennusrungon suunnittelussa paaluperustusten rakenteellinen toiminta yksinkertaistetaan tavallisesti rungon jäykistystavan perusteella, joko täysin jäykäksi tai nivelelliseksi tuennaksi. Kuitenkin todellisuudessa paalutuksen joustavuuden seurauksena paaluperustuksen jäykkyys on näiden kahden rakennemallin välissä. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin paaluperustuksen jäykkyyden vaikutusta rungon rakennesuunnittelussa. Työn kirjallisuuskatsaukseen perustuvassa osassa tarkasteltiin tukipaalutuksen suunnittelun periaatteita sekä selvitettiin paaluryhmän jäykkyyden määrittäminen siirtymämenetelmään perustuen. Työn laskennallisessa osassa paaluperustuksen jäykkyyden vaikutusta tarkasteltiin tavanomaisen teräsrakenteisen turbiinihallin pääkehän suunnittelussa. Kehän pääraakenneosat muodostivat HEA-profiiliset pilarit sekä teräspuikiprofiilivalmisteinen riskko. Laskennallinen tutkimus suoritettiin tasotapauksena niin rungon pääkehän kuin paalutuksenkin suhteen.

Paaluanturaan kohdistuvien kuormakomponenttien aiheuttaman siirtymätilan perusteella paalutukselle määritettiin vastaavat jousivakiot. Jousivakiot syötettiin FEM-laskentamallin perustusliitosten vapausasteiksi, jolloin paalutuksen joustavuuden vaikutus rakennemallissa saatiin selville. Laskentaperiaatteessa paaluantura oletettiin ideaalijäykäksi kappaleeksi, johon syntyy kuormitusten seurauksena vaak- ja pystysuuntaiset siirtymät sekä kiertymä. Paaluperustuksen suunnittelussa ei huomioitu maan sivuttaisvastuksen edullista vaikutusta, vaan kaikki vaakakuormat suunniteltiin vastaanotettaviksi vinopaaluilla. Paalut käsiteltiin aksiaalisesti puristettuina nivelpäisinä sauvoina, eikä paaluille sallittu omaa painoa enempää vetorasitusta. Jäykkäkantaisen ja -nurkkaisen tasokehän laskenta suoritettiin ensin täysin jäykästi mallinnettujen perustusliitosten tapauksessa, jonka perusteella määritettiin tarvittava paalutus ja sitä vastaava jäykkyys. Paalutuksen mallinnustapaa, jossa paaluryhmän siirtymätilan perusteella määritetyt jousivakiot syötettiin laskentamallin perustusliitoksien vapausasteiksi, verrattiin työssä myös rakennemalliin, jossa paaluperustus on mallinnettu kokonaisuudessaan kytkettynä runkoon.

Johtopäätökset

Tutkimuksen perusteella vino- ja pystypaaluista muodostuvalle paaluryhmälle ei voida yleisesti määrittää vakiojäykkyyttä ilmentäviä jousivakioita perustusliitoksen tasossa, sillä paaluanturan vaakasuuntainen liiketila ja kiertymä kiertokeskiön suhteen vaihtelevat merkittävästi perustukseen kohdistuvan leikkausvoiman ja taivutusmomentin kuormitus-tilannekohtaisten arvojen vaihtelevuuden seurauksena. Tällöin paalutuksen jäykkyyden määrittelystä tulee työlästä, sillä jokaiselle kuormitusyhdistelmälle tulee määritellä perustuskohteisesti muuttuvien kuormitusten mukaiset jäykkyydet. Tällaisen menettelyn

voidaan todeta olevan käytännön suunnittelun kannalta hyvin epäkäytännöllinen. Käytännön suunnittelussa paaluperustuksen huomioon ottaminen onkin kannattavampaa suorittaa mallintaen paaluperustus kokonaisuudessaan kytkettynä runkoon.

Paalutuksen joustavuuden seurauksena kehän rasituksissa havaittiin selvä uudelleenjakautuminen. Tutkimuksessa paalutuksen jäykkyyden vaikutuksia vertailtiin parametri-
sesti muuttamalla paalujen tunkeumasyyvyyttä sekä paalutuksen leveyttä. Paalujen tunkeumasyyvyyttä kasvattamalla paalutuksen jäykkyyden havaittiin pienenevän. Paalujen pituuden kaksinkertaistamisen havaittiin johtavan paalutuksen jäykkyyden puolittumiseen. Suorittaessa rakenneanalyysi paalutuksen joustavuuden huomioon ottavalle rakennemallille havaittiin perustusta rasittavien taivutusmomenttien ja leikkausvoimien arvojen pienenevän verrattuna täysin jäykkään perustukseen. Vastaavasti kehää suunnassa jäykistävän kattotason vinosidejärjestelmän havaittiin keräävän suuremman rasituksen, kun paalutuksen jäykkyys otettiin rakennemallissa huomioon. Myös tasokehän jäykkien pilari-ristikko-nurkkaliitosten havaittiin keräävän suurempia rasituksia, kun paalutuksen joustavuus otettiin rakennemallissa huomioon. Tarkastellussa rungossa paalutuksen joustavuuden seurauksena pilarien perustusliitoksessa vaikuttavan suurimman taivutusmomentin havaittiin pienenevän n. 1-10% ja pilarien yläpäässä ristikon alapaarten tasossa vaikuttavan suurimman taivutusmomentin havaittiin vastaavasti kasvavan n. 1-5% verrattuna täysin jäykkien perustusliitosten rakennemalliin. Tarkastellussa tilanteessa paalujen tunkeumasyyvyyden kasvattaminen viidellä metrillä johti perustusliitoksessa vaikuttavan taivutusmomentin pienenemiseen n. 1% sekä pilarien yläpään maksimitaivutusmomenttien kasvamiseen ristikon alapaarten tasossa n. 0,5%. Myös paalutuksen leveyttä kasvattamalla paaluryhmän jäykkyyden havaittiin kasvavan. Tarkastellussa tilanteessa paalutuksen leventämisen arvosta 3 m arvoon 6 m havaittiin kasvattavan pilarien perustusliitoksessa vaikuttavaa taivutusmomentin arvoa n. 9% ja pienentävän pilarien yläpäässä vaikuttavan maksimitaivutusmomentin arvoa n. 2%.

Paaluperustuksen joustavuudella ei havaittu olevan tutkimuksessa tarkasteltavassa tilanteessa merkittävää vaikutusta tasokehän ristikon kannalta tarkasteltaessa ristikon keskiosan paarteita sekä uumasauvoja. Suurimmat erot ristikon rasitusjakaumassa paalutuksen joustavuuden vaikutuksesta havaittiin syntyvän nurkkaliitokseen liittyviin ylä- ja alapaarteiden reunimmaisiiin solmuväleihin, jotka eivät kuitenkaan paarteiden mitoituksen kannalta ole määrääviä poikkileikkauskohtia. Näin ollen paalutuksen joustavuuden vaikutus voidaan tarkastellussa tilanteessa nähdä ristikon mitoittamisen kannalta vähäisenä.

Kehän pilareita tarkasteltaessa paaluperustuksen joustavuuden vaikutukset havaittiin jäykän pilari-ristikko-nurkkaliitoksen rasitusten kasvamisena sekä pilarin juuren poikkileikkausta rasittavan taivutusmomentin ja leikkausvoiman pienenemisenä. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että tapauksessa, jossa pilarin juuren rasitukset olisivat mitoitettava tekijä ja mitoitus tehtäisiin täydelle poikkileikkauksen kapasiteetille huomioiden

paaluanturan joustavuus, päädyttäisiin epävarmalle puolelle, mikäli todellisuudessa paalutus olisikin arvioitua jäykempi, jolloin perustus keräisi suuremman rasituksen. Vastavasti, mikäli pilarin yläpään rasitukset olisivat mitoittava tekijä, voitaisiin mitoittamisessa päätyä epävarmalle puolelle, jos pilarin yläpään rasituksissa ei huomioitaisi paalutuksen joustavuudesta aiheutuvaa rasituksia kasvattavaa vaikutusta.

Paaluperustuksen joustavuuden vaikutuksesta pilarin nurjahduspituuden havaittiin kasvavan. Kuitenkin tutkimuksessa tarkastellussa tilanteessa paalutuksen jäykkyys muodostui niin suureksi, että sen joustavuudesta aiheutui verrattain vähäinen vaikutus pilarin nurjahduspituudelle. Tasokehän pilarin nurjahduspituuden havaittiin kasvavan n. 1-3% tarkasteltujen paalutuksien joustavuuden seurauksena verrattuna täysin jäykän perustusliitoksen mukaiseen rakennemalliin. Joka tapauksessa tilanteessa, jossa pilarin käyttöaste olisi mitoitettu hyvin korkeaksi nurjahtamisen suhteen, voisi käydä niin, että paalutuksen joustaminen johtaisi todellisuudessa pilarin stabiliteetin menettämiseen. Näin ollen tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että pilarin stabiliteettianalyysin kannalta paaluperustuksen käsitteleminen täysin jäykkänä on epävarmalla puolella.

Tutkimuksessa tarkastellun tasokehän vaakasuuntaisen siirtymän havaittiin kasvavan paaluperustuksen joustavuuden seurauksena. Tarkasteltujen paalutuksien joustavuuden seurauksena kehän vaakasuuntaisen siirtymän havaittiin kasvavan n. 1-6% verrattuna täysin jäykkien perustusliitosten rakennemallin mukaiseen arvoon. Tutkittaessa eri jäykkyyden omaavia paalutuksia havaittiin paalutuksen joustavuuden vaikutus epälineaariseksi tarkasteltaessa rungon siirtymää. Vastaava vaikutus havaittiin myös rungon rasitusjakamaa sekä pilarin nurjahduspituutta tutkittaessa. Tutkimuksen perusteella havaittiin, että mitä joustavampi paalutus on, sitä suurempi suhteellinen vaikutus paaluryhmän jäykkyydellä on tarkasteltujen suureiden kannalta.

Paaluperustuksen joustavuuden vaikutuksista on erittäin haastava antaa rungon rakennesuunnittelun kannalta yleispäteviä suosituksia, sillä paalutuksen todellinen jäykkyys on hyvin voimakkaasti riippuvainen paalutuskohteen yksilöidyistä ominaisuuksista niin paalutustyön kuin suunnittelunkin suhteen. Esimerkiksi todelliset paalupituudet voivat poiketa suunnitellussa käytetyistä arvoista rakennuspaikan pohjaolosuhteiden perusteella, jolloin paalutuksen todellinen jäykkyys eroaa rungon suunnittelussa käytetystä oletusjäykkyydestä. Samoin paalutustyössä syntyvillä sijainti- ja kaltevuuspoikkeamilla on vaikutusta paaluryhmälle muodostuvalle jäykkyydelle. Käytännössä todellinen paaluryhmän jäykkyys on varmuudella selvillä vasta siinä vaiheessa, kun paalutustyö on hyväksytysti suoritettu, mikä on rungon suunnitteluajataulun kannalta varsin ongelmallista, jos paalutuksen tarkka jäykkyys halutaan sisällyttää suunnitteluun. Myös paalutuksen suunnittelussa tehtävillä yksinkertaistuksilla vaikutetaan merkittävästi siihen, kuinka jäykkänä paaluryhmää käsitellään. Paalutuksen jäykkyyden suhteen on suunnittelussa kuitenkin haastavaa tehdä ns. varman puolen oletusta. Kuten havaittua on paalutuksen jäykkyyden vaihtelulla erilainen vaikutus silloin, kun tarkastellaan runkoon muodostuvia rasituksia

tai rungon stabiliteettia. Esimerkiksi oletettaessa paalutuksen jäykkyys pienemmäksi suunnittelussa tehtävän yksinkertaistuksen perusteella, ollaan rungon stabiliteettitarkastelun suhteen varmallalla puolella, mutta toisaalta perustus kerää tällöin vähemmän kuormaa, kuin jäykempänä, joten rungon rakenteiden rasituksia vastaavien kapasiteettien suhteen vastaava oletus voi olla epävarmalla puolella.

Jatkotutkimusehdotukset

Tässä tutkimuksessa maan sivuttaisvastuksen edullista vaikutusta ei otettu huomioon paaluperustuksen tarkasteluissa. Todellisuudessa maaperän ominaisuuksien perusteella sivuttaisvastuksella voi olla suurikin merkitys etenkin rakenteissa, joissa perustuksiin kohdistuu massiivisia vaakakuormituksia. Näin ollen maan edullisen vaikutuksen huomioon ottaminen paaluperustuksen jäykkyyden määrittelyssä voisi olla kannattavaa selvittää tarkemmin tilanteessa, jossa maaperän ominaisuudet ovat sellaiset, että ne voidaan riittävällä varmuudella ottaa paalutuksen jäykkyyden laskennassa huomioon.

Pilarin ja anturan välisen liitoksen oletettiin tässä tutkimuksessa siirtävän rasitukset täysin jäykkänä kokonaisuutena. Todellisuudessa pilarin ja perustuksen väliseen liitokseen syntyy myös muodonmuutoksia siihen kohdistuvien rasitusten seurauksena. Jatkotutkimuksissa voisi olla tarpeellista selvittää tämän liitoksen (toteutustavan mukaisesti, esimerkiksi peruspulttiliitos) joustavuuden vaikutus paaluperustuksen kokonaisjäykkyydelle ja näin myös rungon rakennesuunnittelulle.

Tutkimuksessa käytetty paalutuksen mallinnustekniikka laskentamallissa on käytännön suunnittelun kannalta melko työläs ja muuntojoustavuudeltaan hidas mallinnustapa. Näin ollen työn myötä voidaan esittää kehitysehdotus algoritmiavusteiselle paalutuksen mallinnustavalle, jonka myötä runkoon kytketyn paaluperustuksen mallinnusta voitaisiin automatisoida.

LÄHTEET

Abdul-Razzaq K. S., Farhood M. A., (2017), Design and Behavior of reinforced concrete pile caps: A Literature review, International Journal of Engineering and Science & Technology, ISSN: 2319-5991, Vol. 6, No. 4, November 2017

Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013 – osa 1, by 211 (2015), Suomen Betoniyhdistys ry

Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2014 – osa 2, by 211 (2015), Suomen Betoniyhdistys ry

Betonirakenteiden yksityiskohtien ja raudoituksen suunnitteluohjeet 1988, 2. Pe-rustukset, by 30-2, (1988), Suomen betoniyhdistys r.y.

Bond A. J., Brooker O., Harris A. J., Harrison T., Moss R. M., Narayanan R. S., Webster R., (2006), How to Design Concrete Structures using Eurocode 2, The Concrete Centre

Bowles, J. E., (1997), Foundation analysis and design, Fifth Edition, The McGraw-Hill Companies, Inc

Cheng C. P., (2005), Designing the Depth of Reinforced Concrete Rigid-Pile Caps for Tall Buildings, The Hong Kong University of Science and Technology

Chore H. S., Ingle R. K., (2008), Soil-structure interaction analyses of pile supported building frame, Department of Applied Mechanics, Visvesvaraya National Institute of Technology, Nagpur-440 010, India, AJSTD Vol. 25 Issue 2, pp. 457-467

Chore H. S., Ingle R. K., Sawant V. A., (2009), Building frame-pile foundation-soil interactive analysis, Interaction and Multiscale Mechanics, Vol. 2, No. 4, (2009), pp. 397-411

Chore H. S., Ingle R. K., Sawant V. A., Building frame – pile foundation – soil interaction analysis: a parametric study, (2010), Interaction and Multiscale Mechanics, Vol. 3, No. 1, (2010), pp. 55-79

Design of Pile Foundations, Engineering and Design, Engineer Manual, 1991, US Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000

Dode P. A., Chore H. S., Agraval D. K., (2014), Interaction analysis of a building frame supported on pile groups, *Coupled System Mechanics*, Vol. 3, No. 3, (2014), pp. 305-318

Eurokoodin ja PO-2011 mukaiset vakiopaaluanturat, (2012), Betoniteollisuus ry

fib Bulletin 3: Structural Concrete - Textbook on Behaviour, Design and Performance, Updated knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990, Volume 3, Durability - Design for fire resistance - Member design - Assessment, maintenance and repair - Practical aspects, December 1999, federation internationale du beton (fib)

Folić B., Folić R., Miličić I. M., (2018), Strut – and – tie model for analysis of piles cap, 6th international conference, Contemporary achievements in civil engineering 20. April 2018. Subotica, Serbia

Galambos T. V., Surovek A. E., (2008), *Structural Stability of Steel: Concepts and Applications for Structural Engineers*, John Wiley & Sons, Inc.

Ghali M. K., (1999), Effect of pile cap flexural rigidity on the behavior of bridge foundations, Zagazig University, Banha Branch, Cairo – Egypt, IABSE reports volume 80, 1999

Helenelund K. V., Pohjarakennus, (1980), Kuudes muuttumaton painos, Otakustantamo

Jutila A., Salokangas L., Syrjä R., (2014), RAK-11.2100 Perustusten ja tukimuurien rakennustekninen suunnittelu, Opetusmoniste, Aalto-yliopisto

Jutila A., Syrjä R., (2012), RAK-11.2100 Perustusten ja tukimuurien rakennustekninen suunnittelu, Esimerkkitehtävät, Aalto-yliopisto

Jääskeläinen R., Pohjarakennuksen perusteet, (2003), Tammertekniikka

Laitakari A., Vakiopaaluperustusten laskenta, Rakennusteollisuus, viitattu: 11.07.2019, saatavissa: https://betoni.com/wp-content/.../08/Vakiopaaluperustuksenlaskenta_Laitakari-1.pdf

Leskelä M., (2008), Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus/by210, Suomen Betoniyhdistys r.y.

LPO-87 Lyöntipaalutusohjeet, (1991), kolmas painos, Suomen geoteknillinen yhdistys r.y.

Perustukset, Teräsbetoniset vakioapaaluanturat RR- ja RD-paaluille, SSAB, viitattu: 12.07.2019 saatavissa: <https://www.ssab.fi/tuotteet/terasluokat/infrastrukturi/infrastructure-downloads>

Pöllänen K., (2015), Vinopaalutus PMx22 (EN16228) lyöntipaalutuskoneella, viitattu: 10.07.2019, saatavissa: <https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/11/Kari-Pöllänen-Vinopaalutus.pdf>

RAK-11.2100, Perustusten ja tukimuurien rakennustekninen suunnittelu, luentokysymykset-dokumentti, Aalto-yliopisto

Rak-54.1300 Rakenteiden mekaniikan perusteet, luennot, Palkin taipuma, s.67-99, Aalto-yliopisto

Rantamäki M., Tammirinne M., (2002), Pohjarakennus, 12. muuttumaton painos, Otatieto Oy

Reynolds C. E., Steedman J. C., (1988), Reinforced Concrete Designer's Handbook, tenth edition, pp. 421, E & FN Spon Ltd

RIL 202-2011/by 61, Betonirakenteiden suunnitteluohje. Eurokoodi, (2011), Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Suomen Betoniyhdistys ry

RIL 207-2017, Geotekninen suunnittelu, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry

RIL 254-2016, Paalutusohje 2016, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry

RIL 121-2004, Pohjarakennusohjeet, Suomen rakennusinsinöörien Liitto r.y.

RIL 166, Pohjarakenteet, (1986), Suomen rakennusinsinöörien Liitto RIL

RR- ja RD-paalut, Suunnittelu- ja asennusohjeet, SSAB, viitattu: 10.07.2019, saatavissa: <https://www.ssab.fi/tuotteet/terasluokat/infrastrukturi/tuotteet/steel-piles-micro-piles>

Runkorakenteet, (2010), Betoniteollisuus ry, Versio 10.3.2010, viitattu: 15.08.2019, saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/runkorakenteet>

Salmi T., Kuula K., (2012), Rakenteiden mekaniikka, Pressus Oy

Salmi T., Pajunen S., (2010), Lujuusoppi, Pressus Oy

Schlaich J., Schäfer K., Jennewein M., (1987), Toward a Consistent Design of Structural Concrete, PCI Journal/May-June 1987

SFS-EN-1992-1-1, Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, 2. painos, (2015), Suomen standardisoimisliitto SFS

Silvennoinen K., Hietanen T., Tikanoja T., Kalliomäki J., (2011), Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan, Osa 6, Perustukset, versio 26.5.2011, Rakennustuoteollisuus RTT ry, viitattu: 11.07.2019, saatavissa: <http://eurocodes.fi/1992/contents1992.htm>

Srivastava V., Chore H. S., Dode P. A., (2016), Interaction of Building Frame with Pile Foundation, Department of Civil Engineering, Datta Meghe College of Engineering, Airoli, Navi Mumbai, India, Open Journal of Civil Engineering, 2016, 6, 195-202, Scientific Research Publishing

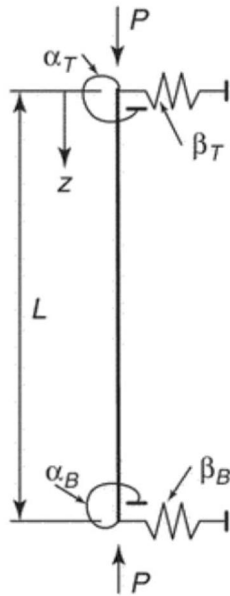
Tomlinson M., Woodward J., (2008), Pile Design and Construction Practice, Fifth Edition, Taylor & Francis Group, London and New York

Tuomala M., Rakenteiden stabiilisuusteoria, luentomoniste, Tampereen teknillinen yliopisto, viitattu: 12.07.2019, saatavissa: <http://www.tut.fi/rakmek/?id=12>

Tuotelehti, PO-2016 mukaiseen paalutuksen suunnitteluun ja paalutustyöhön RT betonipaaluilla. viitattu: 10.07.2019, saatavissa: <https://betoni.com/betonirakentaminen/paalut/>

LIITE A: JOUSITUETUN SAUVAN NURJAHDUSANALYYSI

Galambos & Surovek, (2008), Structural stability of steel : concepts and applications for structural engineers, pp. 59



Taipuman differentiaaliyhtälö

$$v^{iv} + k^2 v'' = 0$$

yleinen ratkaisu

$$v(z) = A + Bz + C \sin(kz) + D \cos(kz)$$

derivaatat

$$v'(z) = B + Ck \cos(kz) - Dk \sin(kz)$$

$$v''(z) = -Ck^2 \sin(kz) - Dk^2 \cos(kz)$$

$$v'''(z) = -Ck^3 \cos(kz) + Dk^3 \sin(kz)$$

Palkkiteorian mukaisesti lausutut sauvan leikkausvoima ja taivutusmomentti:

$$Q = -EIv''' \quad M = -EIv''$$

Tukien jousivoimat:

$$R = \beta \cdot v \quad M = \alpha \cdot v'$$

Dimensiottomat jousivakiot:

$$\begin{aligned} R_T &= \frac{\alpha_T \cdot L}{E \cdot I} & R_B &= \frac{\alpha_B \cdot L}{E \cdot I} & T_T &= \frac{\beta_T \cdot L^3}{E \cdot I} & T_B &= \frac{\beta_B \cdot L^3}{E \cdot I} \\ \alpha_T &= \frac{R_T \cdot E \cdot I}{L} & \alpha_B &= \frac{R_B \cdot E \cdot I}{L} & \beta_T &= \frac{T_T \cdot E \cdot I}{L^3} & \beta_B &= \frac{T_B \cdot E \cdot I}{L^3} \end{aligned}$$

Normaalivoima:

$$P = k^2 \cdot EI \quad k = \sqrt{\frac{P}{EI}}$$

Reunaehdot

Sauvan yläpäässä, $z=0$

Q-reunaehto

$$-EIv''' - P \cdot v' = \beta_T v$$

$$-EIv''' - k^2 \cdot EI \cdot v' = \frac{T_T \cdot E \cdot I}{L^3} \cdot v$$

$$v''' + k^2 \cdot v' + \frac{T_T}{L^3} \cdot v = 0$$

$$-Ck^3 \cos(kz) + Dk^3 \sin(kz) + k^2 (B + Ck \cos(kz) - Dk \sin(kz)) + \frac{T_T}{L^3} \cdot (A + Bz + C \sin(kz) + D \cos(kz)) = 0$$

$$-Ck^3 + k^2 (B + Ck) + \frac{T_T}{L^3} \cdot (A + D) = 0$$

$$-Ck^3 + k^2 \cdot B + Ck^3 + \frac{T_T}{L^3} \cdot A + \frac{T_T}{L^3} \cdot D = 0$$

$$\frac{T_T}{L} \cdot A + (kL)^2 \cdot B + \frac{T_T}{L} \cdot D = 0$$

M-reunaehto

$$-EIv'' = -\alpha_T v'$$

$$-EIv'' = \frac{R_T \cdot E \cdot I}{L} \cdot v'$$

$$-v'' + \frac{R_T}{L} \cdot v' = 0$$

$$-(-Ck^2 \sin(kz) - Dk^2 \cos(kz)) + \frac{R_T}{L} \cdot (B + Ck \cos(kz) - Dk \sin(kz)) = 0$$

$$Dk^2 + \frac{R_T}{L} \cdot (B + Ck) = 0$$

$$R_T \cdot L \cdot B + R_T \cdot kL \cdot C + (kL)^2 \cdot D = 0$$

Sauvan alapäässä, $z=L$:

Q-reunaehto

$$-EIv''' - Pv' = -\beta_B v$$

$$-EIv''' - k^2 \cdot EI \cdot v' = -\frac{T_B \cdot E \cdot I}{L^3} \cdot v$$

$$-v''' - k^2 \cdot v' + \frac{T_B}{L^3} \cdot v = 0$$

$$\begin{aligned} & -(-Ck^3 \cos(kL) + Dk^3 \sin(kL)) - k^2 \cdot (B + Ck \cos(kL) - Dk \sin(kL)) \downarrow = 0 \\ & + \frac{T_B}{L^3} \cdot (A + B \cdot L + C \sin(kL) + D \cos(kL)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & Ck^3 \cos(kL) - Dk^3 \sin(kL) - k^2 \cdot B - Ck^3 \cdot \cos(kL) + Dk^3 \sin(kL) \downarrow = 0 \\ & + \frac{T_B}{L^3} \cdot A + \frac{T_B}{L^2} \cdot B + \frac{T_B}{L^3} \cdot C \sin(kL) + \frac{T_B}{L^3} \cdot D \cos(kL) \end{aligned}$$

$$-k^2 \cdot B + \frac{T_B}{L^3} \cdot A + \frac{T_B}{L^2} \cdot B + \frac{T_B}{L^3} \cdot C \cdot \sin(kL) + \frac{T_B}{L^3} \cdot D \cdot \cos(kL) = 0$$

$$\frac{T_B}{L} \cdot A + (T_B - (kL)^2) \cdot B + \frac{T_B}{L} \cdot \sin(kL) \cdot C + \frac{T_B}{L} \cdot \cos(kL) \cdot D = 0$$

M-reunaehto

$$-EIv'' = \alpha_B v'$$

$$-EIv'' = \frac{R_B \cdot E \cdot I}{L} \cdot v'$$

$$v'' + \frac{R_B}{L} \cdot v' = 0$$

$$-Ck^2 \sin(kL) - Dk^2 \cos(kL) + \frac{R_B}{L} \cdot (B + Ck \cos(kL) - Dk \sin(kL)) = 0$$

$$-C \cdot (kL)^2 \sin(kL) - D(kL)^2 \cos(kL) + R_B \cdot L \cdot (B + Ck \cos(kL) - Dk \sin(kL)) = 0$$

$$-C \cdot (kL)^2 \sin(kL) - D(kL)^2 \cos(kL) + R_B \cdot L \cdot B + R_B \cdot kL \cdot \cos(kL) \cdot C - R_B \cdot kL \cdot \sin(kL) \cdot D = 0$$

$$R_B \cdot L \cdot B + (R_B \cdot kL \cdot \cos(kL) - (kL)^2 \cdot \sin(kL)) \cdot C + (-R_B \cdot kL \cdot \sin(kL) - (kL)^2 \cos(kL)) \cdot D = 0$$

Sauvan päiden Q- ja M-reunaehdot

$$\frac{T_T}{L} \cdot A + (kL)^2 \cdot B + \frac{T_T}{L} \cdot D = 0$$

$$R_T \cdot L \cdot B + R_T \cdot kL \cdot C + (kL)^2 \cdot D = 0$$

$$\frac{T_B}{L} \cdot A + (T_B - (kL)^2) \cdot B + \frac{T_B}{L} \cdot \sin(kL) \cdot C + \frac{T_B}{L} \cdot \cos(kL) \cdot D = 0$$

$$R_B \cdot L \cdot B + (R_B \cdot kL \cdot \cos(kL) - (kL)^2 \cdot \sin(kL)) \cdot C + (-R_B \cdot kL \cdot \sin(kL) - (kL)^2 \cdot \cos(kL)) \cdot D = 0$$

Yhtälöryhmän kerroinmatriisi

$$M(kL) = \begin{bmatrix} \frac{T_T}{L} & (kL)^2 & 0 & \frac{T_T}{L} \\ 0 & R_T \cdot L & R_T \cdot kL & (kL)^2 \\ \frac{T_B}{L} & T_B - (kL)^2 & \frac{T_B}{L} \cdot \sin(kL) & \frac{T_B}{L} \cdot \cos(kL) \\ 0 & R_B \cdot L & R_B \cdot kL \cdot \cos(kL) - (kL)^2 \cdot \sin(kL) & -R_B \cdot kL \cdot \sin(kL) - (kL)^2 \cdot \cos(kL) \end{bmatrix}$$

Kerroinmatriisin determinantin osoittaja ratkaistuna Mathcad Prime 4.0-ohjelmassa

$$\begin{aligned} f(kL) = & T_B \cdot kL^6 \cdot \sin(kL) + T_T \cdot kL^6 \cdot \sin(kL) - R_B \cdot T_B \cdot kL^5 \cdot \cos(kL) \downarrow \\ & - R_B \cdot T_T \cdot kL^5 \cdot \cos(kL) - T_B \cdot R_T \cdot kL^5 \cdot \cos(kL) - R_T \cdot T_T \cdot kL^5 \cdot \cos(kL) \downarrow \\ & - T_B \cdot T_T \cdot kL^4 \cdot \sin(kL) + R_B \cdot T_B \cdot T_T \cdot kL^3 \cdot \cos(kL) + T_B \cdot R_T \cdot T_T \cdot kL^3 \cdot \cos(kL) \downarrow \\ & - R_B \cdot T_B \cdot R_T \cdot kL^4 \cdot \sin(kL) - R_B \cdot T_B \cdot T_T \cdot kL^2 \cdot \sin(kL) - R_B \cdot R_T \cdot T_T \cdot kL^4 \cdot \sin(kL) \downarrow \\ & - T_B \cdot R_T \cdot T_T \cdot kL^2 \cdot \sin(kL) - R_B \cdot T_B \cdot R_T \cdot T_T \cdot kL + 2 \cdot R_B \cdot T_B \cdot R_T \cdot T_T \cdot kL \cdot \cos(kL) \downarrow \\ & - R_B \cdot T_B \cdot R_T \cdot T_T \cdot kL \cdot \cos(kL)^2 - R_B \cdot T_B \cdot R_T \cdot T_T \cdot kL \cdot \sin(kL)^2 + R_B \cdot T_B \cdot R_T \cdot T_T \cdot kL^2 \cdot \sin(kL) \end{aligned}$$

Esimerkkipilarin HEA 700 nurjahduspituuden ratkaisu

Kimmokerroin: $E := 355 \text{ GPa}$

Neliömomentti: $I := 215300 \text{ cm}^4$

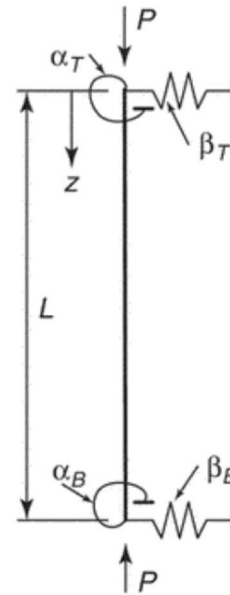
Pituus: $L := 25.2 \text{ m}$

Rotaatiojousi YP: $\alpha_T := 10^{10} \text{ kN} \cdot \text{m}$

Translaatiojousi YP: $\beta_T := 11500 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Rotaatiojousi AP: $\alpha_B := 2284557 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Translaatiojousi AP: $\beta_B := 49123 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$



Jousivakioiden
dimensiottomat arvot:

$$R_T := \frac{\alpha_T \cdot L}{E \cdot I} = 3.297 \cdot 10^5$$

$$R_B := \frac{\alpha_B \cdot L}{E \cdot I} = 75.323$$

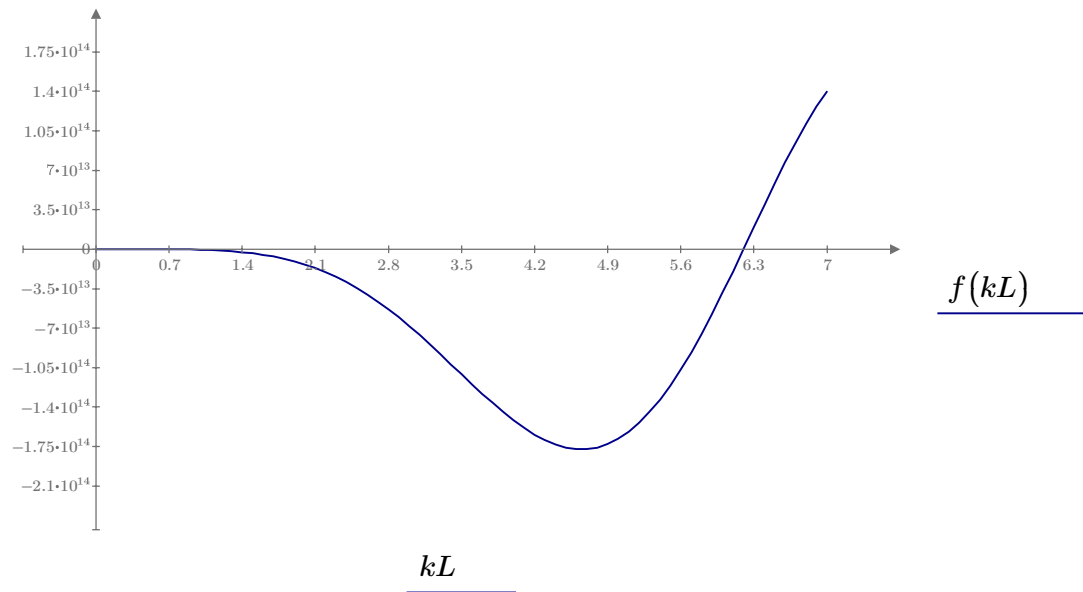
$$T_T := \frac{\beta_T \cdot L^3}{E \cdot I} = 240.784$$

$$T_B := \frac{\beta_B \cdot L^3}{E \cdot I} = 1.029 \cdot 10^3$$

Sauvan päiden reunaehdoista muodostetun yhtälöryhmän kerroinmatriisin determinantin nollakohdan ratkaiseminen:

$$\begin{aligned} f(kL) := & T_B \cdot kL^6 \cdot \sin(kL) + T_T \cdot kL^6 \cdot \sin(kL) - R_B \cdot T_B \cdot kL^5 \cdot \cos(kL) \downarrow \\ & - R_B \cdot T_T \cdot kL^5 \cdot \cos(kL) - T_B \cdot R_T \cdot kL^5 \cdot \cos(kL) - R_T \cdot T_T \cdot kL^5 \cdot \cos(kL) \downarrow \\ & - T_B \cdot T_T \cdot kL^4 \cdot \sin(kL) + R_B \cdot T_B \cdot T_T \cdot kL^3 \cdot \cos(kL) + T_B \cdot R_T \cdot T_T \cdot kL^3 \cdot \cos(kL) \downarrow \\ & - R_B \cdot T_B \cdot R_T \cdot kL^4 \cdot \sin(kL) - R_B \cdot T_B \cdot T_T \cdot kL^2 \cdot \sin(kL) - R_B \cdot R_T \cdot T_T \cdot kL^4 \cdot \sin(kL) \downarrow \\ & - T_B \cdot R_T \cdot T_T \cdot kL^2 \cdot \sin(kL) - R_B \cdot T_B \cdot R_T \cdot T_T \cdot kL + 2 \cdot R_B \cdot T_B \cdot R_T \cdot T_T \cdot kL \cdot \cos(kL) \downarrow \\ & - R_B \cdot T_B \cdot R_T \cdot T_T \cdot kL \cdot \cos(kL)^2 - R_B \cdot T_B \cdot R_T \cdot T_T \cdot kL \cdot \sin(kL)^2 + R_B \cdot T_B \cdot R_T \cdot T_T \cdot kL^2 \cdot \sin(kL) \end{aligned}$$

$$kL := 0, 0.1 \dots 7$$



$$kL0 := 6$$

$$kL := \text{root}(f(kL), kL0) = 6.201$$

Nurjahduspituuden määrittäminen muuttujan kL perusteella:

$$k = \sqrt{\frac{P}{EI}} \quad P = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L_{cr}^2}$$

$$k \cdot L = \sqrt{\frac{P}{EI}} \cdot L$$

$$k \cdot L = \sqrt{\frac{\frac{\pi^2 \cdot EI}{L_{cr}^2}}{EI}} \cdot L$$

$$k \cdot L = \frac{\pi}{L_{cr}} \cdot L$$

$$L_{cr} := \frac{\pi}{kL} \cdot L = 12.77 \text{ m}$$

$$\frac{L_{cr}}{L} = 0.51$$



LIITE B: TASOKEHÄN RFEM-LASKENTARAPORTTI

Page: 1/9

Sheet: 1

MODEL

Project: M-kehä

Model: Tasokehä_Liite_B

Date: 23.9.2019

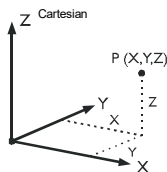
■ MODEL - GENERAL DATA

General	Model name	: Tasokehä_Liite_B
	Project name	: M-kehä
Options	Type of model	: 3D
	Positive direction of global axis Z	: Upward
	Classification of load cases and combinations	: According to Standard: EN 1990 National Annex: SFS - Finland
	<input checked="" type="checkbox"/> Automatically create combinations	: <input checked="" type="checkbox"/> Load Combinations
	<input type="checkbox"/> RF-FORM-FINDING - Find initial equilibrium shapes of membrane and cable structures	
	<input type="checkbox"/> RF-CUTTING-PATTERN	
	<input type="checkbox"/> Piping analysis	
	<input type="checkbox"/> Use CQC Rule	
	<input type="checkbox"/> Enable CAD/BIM model	
	Standard Gravity g	: 10.00 m/s ²

■ FE MESH SETTINGS

General	Target length of finite elements	l_{FE}	: 0.500 m
	Maximum distance between a node and a line to integrate it into the line	ϵ	: 0.001 m
	Maximum number of mesh nodes (in thousands)		: 500
Members	Number of divisions of members with cable, elastic foundation, taper, or plastic characteristic		: 10
	<input checked="" type="checkbox"/> Activate member divisions for large deformation or post-critical analysis		
	<input checked="" type="checkbox"/> Use division for members with node lying on them		
Surfaces	Maximum ratio of FE rectangle diagonals	Δ_D	: 1.800
	Maximum out-of-plane inclination of two finite elements	α	: 0.50 °
	Shape direction of finite elements		: Triangles and quadrangles <input checked="" type="checkbox"/> Same squares where possible

■ 1.1 NODES



Node No.	Node Type	Reference Node	Coordinate System	Node Coordinates			Comment
				X [m]	Y [m]	Z [m]	
1	Standard	-	Cartesian	0.000	0.000	0.000	
2	Standard	-	Cartesian	0.000	0.000	25.200	
3	Standard	-	Cartesian	23.150	0.000	20.350	
4	Standard	-	Cartesian	23.750	0.000	25.200	
5	Standard	-	Cartesian	0.000	0.000	23.450	
6	Standard	-	Cartesian	23.750	0.000	23.450	
7	Standard	-	Cartesian	11.875	0.000	26.750	
8	Standard	-	Cartesian	1.960	0.000	25.456	
9	Standard	-	Cartesian	4.440	0.000	23.450	
10	Standard	-	Cartesian	4.440	0.000	25.780	
11	Standard	-	Cartesian	6.920	0.000	26.103	
12	Standard	-	Cartesian	9.400	0.000	23.450	
13	Standard	-	Cartesian	9.400	0.000	26.427	
14	Standard	-	Cartesian	21.790	0.000	25.456	
15	Standard	-	Cartesian	19.310	0.000	23.450	
16	Standard	-	Cartesian	19.310	0.000	25.780	
17	Standard	-	Cartesian	16.830	0.000	26.103	
18	Standard	-	Cartesian	14.350	0.000	23.450	
19	Standard	-	Cartesian	14.350	0.000	26.427	
20	Standard	-	Cartesian	19.760	0.000	25.721	
21	Standard	-	Cartesian	17.430	0.000	26.025	
22	Standard	-	Cartesian	15.280	0.000	26.306	
23	Standard	-	Cartesian	12.950	0.000	26.610	
24	Standard	-	Cartesian	10.800	0.000	26.610	
25	Standard	-	Cartesian	8.470	0.000	26.306	
26	Standard	-	Cartesian	6.100	0.000	25.996	
27	Standard	-	Cartesian	1.620	0.000	25.411	
28	Standard	-	Cartesian	0.000	0.000	20.350	
29	Standard	-	Cartesian	0.600	0.000	20.350	
30	Standard	-	Cartesian	0.000	0.000	28.350	
31	Standard	-	Cartesian	4.440	0.000	23.450	
32	Standard	-	Cartesian	23.750	0.000	25.200	
33	Standard	-	Cartesian	23.750	0.000	28.350	
34	Standard	-	Cartesian	23.750	0.000	20.350	
35	Standard	-	Cartesian	23.150	0.000	20.350	
37	Standard	-	Cartesian	0.000	0.000	15.850	
38	Standard	-	Cartesian	0.000	0.000	11.350	
39	Standard	-	Cartesian	0.000	0.000	6.050	
40	Standard	-	Cartesian	23.750	0.000	15.850	
41	Standard	-	Cartesian	23.750	0.000	11.350	
42	Standard	-	Cartesian	23.750	0.000	6.050	
43	Standard	-	Cartesian	23.750	0.000	0.000	



Page: 2/9

Sheet: 1

MODEL

Project: M-kehä

Model: Tasokehä_Liite_B

Date: 23.9.2019

1.2 LINES

Line No.	Line Type	Nodes No.	Line Length L [m]		Comment
1	Polyline	1,28	20.350	Z	
2	Polyline	43,34	20.350	Z	
3	Polyline	5,9	4.440	X	
4	Polyline	5,2	1.750	Z	
5	Polyline	6,4	1.750	Z	
6	Polyline	2,8	1.977	XZ	
7	Polyline	7,19	2.496	XZ	
8	Polyline	5,8	2.804	XZ	
9	Polyline	8,10	2.501	XZ	
10	Polyline	8,9	3.190	XZ	
11	Polyline	9,12	4.960	X	
12	Polyline	9,10	2.330	Z	
13	Polyline	10,11	2.501	XZ	
14	Polyline	9,11	3.632	XZ	
15	Polyline	11,13	2.501	XZ	
16	Polyline	11,12	3.632	XZ	
17	Polyline	12,18	4.950	X	
18	Polyline	12,13	2.977	Z	
19	Polyline	13,7	2.496	XZ	
20	Polyline	12,7	4.125	XZ	
21	Polyline	6,14	2.804	XZ	
22	Polyline	14,4	1.977	XZ	
23	Polyline	14,15	3.190	XZ	
24	Polyline	15,6	4.440	X	
25	Polyline	15,16	2.330	Z	
26	Polyline	16,14	2.501	XZ	
27	Polyline	15,17	3.632	XZ	
28	Polyline	17,16	2.501	XZ	
29	Polyline	17,18	3.632	XZ	
30	Polyline	18,15	4.960	X	
31	Polyline	18,19	2.977	Z	
32	Polyline	19,17	2.501	XZ	
33	Polyline	18,7	4.125	XZ	
35	Polyline	2,30	3.150	Z	
36	Polyline	28,29	0.600	X	
39	Polyline	4,33	3.150	Z	
40	Polyline	34,35	0.600	X	
45	Polyline	28,5	3.100	Z	
46	Polyline	34,6	3.100	Z	

1.3 MATERIALS

Matl. No.	Modulus E [kN/cm ²]	Modulus G [kN/cm ²]	Poisson's Ratio ν [-]	Spec. Weight γ [kN/m ³]	Coeff. of Th. Exp. α [1/°C]	Partial Factor γ_M [-]	Material Model
1	Steel S 355 EN 10025-2:2004-11 21000.00	8076.92	0.300	78.50	1.20E-05	1.00	Isotropic Linear Elastic

1.7 NODAL SUPPORTS

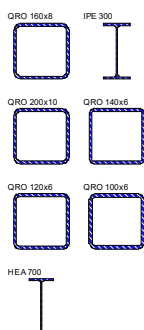
Support No.	Nodes No.	Axis System	Column in Z	Support Conditions
1	1,43	Global X,Y,Z	<input type="checkbox"/>	u_x <input checked="" type="checkbox"/> u_y <input checked="" type="checkbox"/> u_z <input checked="" type="checkbox"/> ϕ_x <input checked="" type="checkbox"/> ϕ_y <input checked="" type="checkbox"/> ϕ_z <input checked="" type="checkbox"/>
2	2,4	Global X,Y,Z	<input type="checkbox"/>	Spring u_x <input checked="" type="checkbox"/> u_y <input checked="" type="checkbox"/> u_z <input type="checkbox"/> ϕ_x <input type="checkbox"/> ϕ_y <input type="checkbox"/> ϕ_z <input type="checkbox"/>
3	7,21,26,28,34,37-42	Global X,Y,Z	<input type="checkbox"/>	u_x <input type="checkbox"/> u_y <input checked="" type="checkbox"/> u_z <input type="checkbox"/> ϕ_x <input type="checkbox"/> ϕ_y <input type="checkbox"/> ϕ_z <input type="checkbox"/>

1.7.2 NODAL SUPPORTS - SPRINGS

Support No.	Nodes No.	Translation Spring [kN/m]	Rotation Spring [kN/rad]
2	2,4	$C_{u,x}$ 11500.000 $C_{u,y}$ - $C_{u,z}$ -	$C_{\phi,x}$ - $C_{\phi,y}$ - $C_{\phi,z}$ -

1.13 CROSS-SECTIONS

Section No.	Matl. No.	J [cm ⁴] A [cm ²]	I_y [cm ⁴] A_y [cm ²]	I_z [cm ⁴] A_z [cm ²]	Principal Axes α [°]	Rotation α' [°]	Overall Dimensions [mm] Width b Height h
1	QRO 160x8 EN 10219-2:2006 1	2897.00 46.40	1741.00 20.58	1741.00 20.58	0.00	0.00	160.0 160.0
2	IPE 300 Euronorm 19-57 1	20.20 53.80	8360.00 26.81	604.00 19.82	0.00	0.00	150.0 300.0
3	QRO 200x10 EN 10219-2:2006 1	7072.00 72.60	4251.00 32.16	4251.00 32.16	0.00	0.00	200.0 200.0
4	QRO 140x6 EN 10219-2:2006 1	1479.00 31.20	920.00 13.55	920.00 13.55	0.00	0.00	140.0 140.0
5	QRO 120x6 EN 10219-2:2006 1	913.00 26.40	562.00 11.55	562.00 11.55	0.00	0.00	120.0 120.0
6	QRO 100x6 EN 10219-2:2006 1	514.00	311.00	311.00	0.00	0.00	100.0 100.0





Page: 3/9

Sheet: 1

MODEL

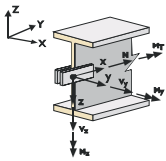
Project: M-kehä

Model: Tasokehä_Liite_B

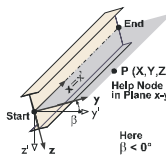
Date: 23.9.2019

1.13 CROSS-SECTIONS

Section No.	Matl. No.	J [cm ⁴] A [cm ²]	I _y [cm ⁴] A _y [cm ²]	I _z [cm ⁴] A _z [cm ²]	Principal Axes α [°]	Rotation α' [°]	Overall Dimensions [mm]	
							Width b	Height h
7	HE A 700 1	21.60 Euronorm 53-62 515.00 260.00	9.54 215300.00 135.38	9.54 12180.00 93.45	0.00	0.00	300.0	690.0

**1.14 MEMBER HINGES**

Release No.	Reference System	Axial/Shear Release or Spring[kN/m]			Moment Release or Spring[kNm/rad]			Comment
		u _x	u _y	u _z	φ _x	φ _y	φ _z	
1	Local x,y,z	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

**1.17 MEMBERS**

Mbr. No.	Line No.	Member	Rotation		Cross-Section		Hinge No.		Ecc. No.	Div. No.	Length L [m]	
			Type	β [°]	Start	End	Start	End				
1	1	Beam	Angle	0.00	7	7	-	-	-	-	20.350	Z
2	2	Beam	Angle	0.00	7	7	-	-	-	-	20.350	Z
3	3	Beam	Angle	0.00	1	1	1	-	-	-	4.440	X
4	4	Beam	Angle	0.00	7	7	-	-	-	-	1.750	Z
5	5	Beam	Angle	0.00	7	7	-	-	-	-	1.750	Z
6	6	Beam	Angle	0.00	3	3	1	-	-	-	1.977	XZ
7	7	Beam	Angle	0.00	3	3	-	-	-	-	2.496	XZ
8	8	Beam	Angle	0.00	1	1	1	1	-	-	2.804	XZ
9	9	Beam	Angle	0.00	3	3	-	-	-	-	2.501	XZ
10	10	Beam	Angle	0.00	4	4	1	1	-	-	3.190	XZ
11	11	Beam	Angle	0.00	1	1	-	-	-	-	4.960	X
12	12	Beam	Angle	0.00	5	5	1	1	-	-	2.330	Z
13	13	Beam	Angle	0.00	3	3	-	-	-	-	2.501	XZ
14	14	Beam	Angle	0.00	4	4	1	1	-	-	3.632	XZ
15	15	Beam	Angle	0.00	3	3	-	-	-	-	2.501	XZ
16	16	Beam	Angle	0.00	5	5	1	1	-	-	3.632	XZ
17	17	Beam	Angle	0.00	1	1	-	-	-	-	4.950	X
18	18	Beam	Angle	0.00	6	6	1	1	-	-	2.977	Z
19	19	Beam	Angle	0.00	3	3	-	-	-	-	2.496	XZ
20	20	Beam	Angle	0.00	5	5	1	1	-	-	4.125	XZ
21	21	Beam	Angle	0.00	1	1	1	1	-	-	2.804	XZ
22	22	Beam	Angle	0.00	3	3	-	1	-	-	1.977	XZ
23	23	Beam	Angle	0.00	4	4	1	1	-	-	3.190	XZ
24	24	Beam	Angle	0.00	1	1	-	1	-	-	4.440	X
25	25	Beam	Angle	0.00	5	5	1	1	-	-	2.330	Z
26	26	Beam	Angle	0.00	3	3	-	-	-	-	2.501	XZ
27	27	Beam	Angle	0.00	4	4	1	1	-	-	3.632	XZ
28	28	Beam	Angle	0.00	3	3	-	-	-	-	2.501	XZ
29	29	Beam	Angle	0.00	5	5	1	1	-	-	3.632	XZ
30	30	Beam	Angle	0.00	1	1	-	-	-	-	4.960	X
31	31	Beam	Angle	0.00	6	6	1	1	-	-	2.977	Z
32	32	Beam	Angle	0.00	3	3	-	-	-	-	2.501	XZ
33	33	Beam	Angle	0.00	5	5	1	1	-	-	4.125	XZ
35	35	Beam	Angle	0.00	2	2	-	-	-	-	3.150	Z
36	36	Rigid Member	Angle	0.00	3	3	-	-	-	-	0.600	X
38	39	Beam	Angle	0.00	2	2	-	-	-	-	3.150	Z
40	40	Rigid Member	Angle	0.00	2	2	-	-	-	-	0.600	X
44	46	Beam	Angle	0.00	7	7	-	-	-	-	3.100	Z
45	45	Beam	Angle	0.00	7	7	-	-	-	-	3.100	Z

1.21 SETS OF MEMBERS

Set No.	Set of Members Description	Type	Member No.	Length [m]	Comment
1	Continuous Members 1	Contin. member	4,45,1	25.200	
2	Continuous Members 2	Contin. member	5,44,2	25.200	

2.1 LOAD CASES

Load Case	Load Case Description	EN 1990 SFS Action Category	Self-Weight - Factor in Direction			
			Active	X	Y	Z
LC1	omapaino	Permanent	<input checked="" type="checkbox"/>	0.000	0.000	-1.000
LC2	lumikuorma	Snow - s-k < 2.75 kN/m ²	<input type="checkbox"/>			
LC3	tuulikuorma +x sisäpaine	Wind	<input type="checkbox"/>			
LC4	tuulikuorma +x sisäimu	Wind	<input type="checkbox"/>			
LC5	tuulikuorma -x sisäimu	Wind	<input type="checkbox"/>			
LC6	tuulikuorma -x sisäpaine	Wind	<input type="checkbox"/>			
LC7	nosturikuorma	Imposed - Category E: storage areas	<input type="checkbox"/>			
LC8	nosturikuorma	Imposed - Category E: storage areas	<input type="checkbox"/>			
LC10	Imp +X	Imperfection	<input type="checkbox"/>			
LC11	Imp -X	Imperfection	<input type="checkbox"/>			



Project: M-kehä

Model: Tasokehä_Liite_B

Date: 23.9.2019

2.1.1 LOAD CASES - CALCULATION PARAMETERS

Load Case	Load Case Description	Calculation Parameters	
LC1	omapaino	Method of analysis : <input checked="" type="radio"/> Geometrically linear analysis Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input checked="" type="radio"/> Newton-Raphson Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, EI _y , EI _z , EA, GA _y , GA _z)	
LC2	lumikuorma	Method of analysis : <input checked="" type="radio"/> Geometrically linear analysis Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input checked="" type="radio"/> Newton-Raphson Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, EI _y , EI _z , EA, GA _y , GA _z)	
LC3	tuulikuorma +x_sisäpaine	Method of analysis : <input checked="" type="radio"/> Geometrically linear analysis Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input checked="" type="radio"/> Newton-Raphson Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, EI _y , EI _z , EA, GA _y , GA _z)	
LC4	tuulikuorma +x_sisäimu	Method of analysis : <input checked="" type="radio"/> Geometrically linear analysis Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input checked="" type="radio"/> Newton-Raphson Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, EI _y , EI _z , EA, GA _y , GA _z)	
LC5	tuulikuorma -x_sisäimu	Method of analysis : <input checked="" type="radio"/> Geometrically linear analysis Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input checked="" type="radio"/> Newton-Raphson Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, EI _y , EI _z , EA, GA _y , GA _z)	
LC6	tuulikuorma -x_sisäpaine	Method of analysis : <input checked="" type="radio"/> Geometrically linear analysis Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input checked="" type="radio"/> Newton-Raphson Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, EI _y , EI _z , EA, GA _y , GA _z)	
LC7	nosturikuorma	Method of analysis : <input checked="" type="radio"/> Geometrically linear analysis Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input checked="" type="radio"/> Newton-Raphson Options : <input checked="" type="checkbox"/> Modify loading by factor: 0.900 Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, EI _y , EI _z , EA, GA _y , GA _z)	
LC8	nosturikuorma	Method of analysis : <input checked="" type="radio"/> Geometrically linear analysis Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input checked="" type="radio"/> Newton-Raphson Options : <input checked="" type="checkbox"/> Modify loading by factor: 0.900 Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, EI _y , EI _z , EA, GA _y , GA _z)	
LC10	Imp +X	Method of analysis : <input checked="" type="radio"/> Geometrically linear analysis Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input checked="" type="radio"/> Newton-Raphson Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, EI _y , EI _z , EA, GA _y , GA _z)	
LC11	Imp -X	Method of analysis : <input checked="" type="radio"/> Geometrically linear analysis Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input checked="" type="radio"/> Newton-Raphson Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, EI _y , EI _z , EA, GA _y , GA _z)	

2.2 ACTIONS

Action	Action Description	EN 1990 SFS Action Category	Acting	Load Cases in Action	
A1	Permanent	Permanent		LC1	omapaino
A2	Snow	Snow - s-k < 2.75 kN/m ²		LC2	lumikuorma
A3	Wind	Wind	Alternative	LC3	tuulikuorma +x_sisäpaine
				LC4	tuulikuorma +x_sisäimu
				LC5	tuulikuorma -x_sisäimu
				LC6	tuulikuorma -x_sisäpaine
A4	Imposed	Imposed - Category E: storage areas	Alternative	LC7	nosturikuorma
				LC8	nosturikuorma

2.3 COMBINATION EXPRESSIONS

CE No.	Description	EN 1990 SFS Design Situation	Settings	
CE1	ULS	ULS (STR/GEO) - Permanent / transient - Eq. 6.10a and 6.10b	Consider : <input checked="" type="checkbox"/> Favorable permanent actions Reduce number : <input checked="" type="checkbox"/> Imperfection load cases Numbering of Generated Combinations : <input checked="" type="checkbox"/> Leading variable actions First number of generated: Result combinations : <input checked="" type="checkbox"/> 1 - Load combinations : <input checked="" type="checkbox"/> 1 - Result combinations : <input checked="" type="checkbox"/> Generate additionally Either/Or result combination (result envelopes) : <input checked="" type="checkbox"/> Generate additionally a separate Either/Or result combination for each combination expression Generated Load Combinations : Method of analysis : Second-order analysis (P-Delta)	



Project: M-kehä

Model: Tasokehä_Liite_B

Date: 23.9.2019

2.3 COMBINATION EXPRESSIONS

CE No.	Description	EN 1990 SFS Design Situation	Settings
CE2	SLS	SLS - Characteristic	Consider : <input type="checkbox"/> Favorable permanent actions <input checked="" type="checkbox"/> Imperfection load cases First number of generated: 1 - Load combinations 1 - Result combinations Result combinations <input checked="" type="checkbox"/> Generate additionally Either/Or result combination (result envelopes) <input checked="" type="checkbox"/> Generate additionally a separate Either/Or result combination for each combination expression Generated Load Combinations Method of analysis : Second-order analysis (P-Delta) Consider : <input type="checkbox"/> Favorable permanent actions <input checked="" type="checkbox"/> Imperfection load cases First number of generated: 1 - Load combinations 1 - Result combinations Result combinations <input checked="" type="checkbox"/> Generate additionally Either/Or result combination (result envelopes) <input checked="" type="checkbox"/> Generate additionally a separate Either/Or result combination for each combination expression Generated Load Combinations Method of analysis : Second-order analysis (P-Delta)
CE3	SLS	SLS - Frequent	Consider : <input type="checkbox"/> Favorable permanent actions <input checked="" type="checkbox"/> Imperfection load cases First number of generated: 1 - Load combinations 1 - Result combinations Result combinations <input checked="" type="checkbox"/> Generate additionally Either/Or result combination (result envelopes) <input checked="" type="checkbox"/> Generate additionally a separate Either/Or result combination for each combination expression Generated Load Combinations Method of analysis : Second-order analysis (P-Delta)
CE4	SLS	SLS - Quasi-permanent	Consider : <input type="checkbox"/> Favorable permanent actions <input checked="" type="checkbox"/> Imperfection load cases First number of generated: 1 - Load combinations 1 - Result combinations Result combinations <input checked="" type="checkbox"/> Generate additionally Either/Or result combination (result envelopes) <input checked="" type="checkbox"/> Generate additionally a separate Either/Or result combination for each combination expression Generated Load Combinations Method of analysis : Second-order analysis (P-Delta)

2.3.4 REDUCTIONS - GOVERNING ACTIONS

Action	Action Description	DS	EN 1990 SFS Action Category	Load Cases in Action	Leading Actions
A2	CE1 / Snow	Qs	Snow - s-k < 2.75 kN/m ²	LC2	<input checked="" type="checkbox"/>
A3	CE1 / Wind	Qw	Wind	LC3 ... LC6	<input checked="" type="checkbox"/>
A4	CE1 / Imposed	QIE	Imposed - Category E: storage areas	LC7 LC8	<input checked="" type="checkbox"/>

2.3.5 IMPERFECTION LOAD CASES

Load Case	Load Case Description	Alternate	Only with Load Cases	Never with Load Cases
LC10	Imp +X	<input checked="" type="checkbox"/>	LC3 LC4	
LC11	Imp -X	<input checked="" type="checkbox"/>	LC5 LC6	

2.5 LOAD COMBINATIONS

Load Combin.	DS	Load Combination Description	No.	Factor	Load Case
CO1	ULS'	1.35G	1	1.35	LC1
CO2	ULS'	1.15G + 1.5Qs + 0.9Qw1 + 1.5QIE1 + Imp1	1	1.15	LC1
			2	1.50	LC2
			3	0.90	LC3
			4	1.50	LC7
			5	1.00	LC10
CO3	ULS'	1.15G + 1.5Qs + 0.9Qw1 + 1.5QIE2 + Imp1	1	1.15	LC1
			2	1.50	LC2
			3	0.90	LC3
			4	1.50	LC8
			5	1.00	LC10
CO4	ULS'	1.15G + 1.5Qs + 0.9Qw2 + 1.5QIE1 + Imp1	1	1.15	LC1
			2	1.50	LC2
			3	0.90	LC4
			4	1.50	LC7
			5	1.00	LC10
CO5	ULS'	1.15G + 1.5Qs + 0.9Qw2 + 1.5QIE2 + Imp1	1	1.15	LC1
			2	1.50	LC2
			3	0.90	LC4
			4	1.50	LC8
			5	1.00	LC10
CO6	ULS'	1.15G + 1.5Qs + 0.9Qw3 + 1.5QIE1 + Imp2	1	1.15	LC1
			2	1.50	LC2



LOADS

Project: M-kehä

Model: Tasokehä_Liite_B

Date: 23.9.2019

2.5 LOAD COMBINATIONS

Load Combin.	DS	Description	No.	Factor	Load Case	
CO7	ULS'	1.15G + 1.5Qs + 0.9Qw3 + 1.5QiE2 + Imp2	3	0.90	LC5	tuulikuorma -x sisäimu
			4	1.50	LC7	nosturikuorma
			5	1.00	LC11	Imp -X
			1	1.15	LC1	omapaino
			2	1.50	LC2	lumikuorma
CO8	ULS'	1.15G + 1.5Qs + 0.9Qw4 + 1.5QiE1 + Imp2	3	0.90	LC5	tuulikuorma -x sisäimu
			4	1.50	LC8	nosturikuorma
			5	1.00	LC11	Imp -X
			1	1.15	LC1	omapaino
			2	1.50	LC2	lumikuorma
CO9	ULS'	1.15G + 1.5Qs + 0.9Qw4 + 1.5QiE2 + Imp2	3	0.90	LC6	tuulikuorma -x sisäpaine
			4	1.50	LC7	nosturikuorma
			5	1.00	LC11	Imp -X
			1	1.15	LC1	omapaino
			2	1.50	LC2	lumikuorma
CO10	ULS'	1.15G + 1.05Qs + 1.5Qw1 + 1.5QiE1 + Imp1	3	0.90	LC6	tuulikuorma -x sisäpaine
			4	1.50	LC8	nosturikuorma
			5	1.00	LC11	Imp -X
			1	1.15	LC1	omapaino
			2	1.05	LC2	lumikuorma
CO11	ULS'	1.15G + 1.05Qs + 1.5Qw1 + 1.5QiE2 + Imp1	3	1.50	LC3	tuulikuorma +x sisäpaine
			4	1.50	LC7	nosturikuorma
			5	1.00	LC10	Imp +X
			1	1.15	LC1	omapaino
			2	1.05	LC2	lumikuorma
CO12	ULS'	1.15G + 1.05Qs + 1.5Qw2 + 1.5QiE1 + Imp1	3	1.50	LC3	tuulikuorma +x sisäpaine
			4	1.50	LC8	nosturikuorma
			5	1.00	LC10	Imp +X
			1	1.15	LC1	omapaino
			2	1.05	LC2	lumikuorma
CO13	ULS'	1.15G + 1.05Qs + 1.5Qw2 + 1.5QiE2 + Imp1	3	1.50	LC4	tuulikuorma +x sisäimu
			4	1.50	LC7	nosturikuorma
			5	1.00	LC10	Imp +X
			1	1.15	LC1	omapaino
			2	1.05	LC2	lumikuorma
CO14	ULS'	1.15G + 1.05Qs + 1.5Qw3 + 1.5QiE1 + Imp2	3	1.50	LC5	tuulikuorma -x sisäimu
			4	1.50	LC7	nosturikuorma
			5	1.00	LC11	Imp -X
			1	1.15	LC1	omapaino
			2	1.05	LC2	lumikuorma
CO15	ULS'	1.15G + 1.05Qs + 1.5Qw3 + 1.5QiE2 + Imp2	3	1.50	LC5	tuulikuorma -x sisäimu
			4	1.50	LC8	nosturikuorma
			5	1.00	LC11	Imp -X
			1	1.15	LC1	omapaino
			2	1.05	LC2	lumikuorma
CO16	ULS'	1.15G + 1.05Qs + 1.5Qw4 + 1.5QiE1 + Imp2	3	1.50	LC6	tuulikuorma -x sisäpaine
			4	1.50	LC7	nosturikuorma
			5	1.00	LC11	Imp -X
			1	1.15	LC1	omapaino
			2	1.05	LC2	lumikuorma
CO17	ULS'	1.15G + 1.05Qs + 1.5Qw4 + 1.5QiE2 + Imp2	3	1.50	LC6	tuulikuorma -x sisäpaine
			4	1.50	LC8	nosturikuorma
			5	1.00	LC11	Imp -X
			1	1.15	LC1	omapaino
			2	1.05	LC2	lumikuorma
CO18	ULS'	0.9G + 1.5Qw1 + Imp1	3	1.00	LC10	Imp +X
			1	0.90	LC1	omapaino
			2	1.50	LC3	tuulikuorma +x sisäpaine
CO19	ULS'	0.9G + 1.5Qw2 + Imp1	3	1.00	LC10	Imp +X
			1	0.90	LC1	omapaino
			2	1.50	LC4	tuulikuorma +x sisäimu
CO20	ULS'	0.9G + 1.5Qw3 + Imp2	3	1.00	LC10	Imp +X
			1	0.90	LC1	omapaino
			2	1.50	LC5	tuulikuorma -x sisäimu
CO21	ULS'	0.9G + 1.5Qw4 + Imp2	3	1.00	LC11	Imp -X
			1	0.90	LC1	omapaino
			2	1.50	LC6	tuulikuorma -x sisäpaine
CO22	S Ch	G + Qs + 0.6Qw1 + QiE1 + Imp1	3	1.00	LC11	Imp -X
			1	1.00	LC1	omapaino
			2	1.00	LC2	lumikuorma
			3	0.60	LC3	tuulikuorma +x sisäpaine
			4	1.00	LC7	nosturikuorma
CO23	S Ch	G + Qs + 0.6Qw1 + QiE2 + Imp1	5	1.00	LC10	Imp +X
			1	1.00	LC1	omapaino
			2	1.00	LC2	lumikuorma
			3	0.60	LC3	tuulikuorma +x sisäpaine
			4	1.00	LC8	nosturikuorma
CO24	S Ch	G + Qs + 0.6Qw2 + QiE1 + Imp1	5	1.00	LC10	Imp +X
			1	1.00	LC1	omapaino
			2	1.00	LC2	lumikuorma
			3	0.60	LC4	tuulikuorma +x sisäimu
			4	1.00	LC7	nosturikuorma
CO25	S Ch	G + Qs + 0.6Qw2 + QiE2 + Imp1	5	1.00	LC10	Imp +X
			1	1.00	LC1	omapaino
			2	1.00	LC2	lumikuorma
			3	0.60	LC4	tuulikuorma +x sisäimu
			4	1.00	LC8	nosturikuorma
CO26	S Ch	G + Qs + 0.6Qw3 + QiE1 + Imp2	5	1.00	LC10	Imp +X
			1	1.00	LC1	omapaino
			2	1.00	LC2	lumikuorma
			3	0.60	LC5	tuulikuorma -x sisäimu
			4	1.00	LC7	nosturikuorma



LOADS

Project: M-kehä

Model: Tasokehä_Liite_B

Date: 23.9.2019

2.5 LOAD COMBINATIONS

Load Combin.	DS	Load Combination		No.	Factor	Load Case	
		Description					
CO27	S Ch	$G + Q_s + 0.6Q_{w3} + Q_{iE2} + Imp2$		5	1.00	LC11	Imp -X
				1	1.00	LC1	omapaino
				2	1.00	LC2	lumikuorma
				3	0.60	LC5	tuulikuorma -x sisäimu
				4	1.00	LC8	nosturikuorma
CO28	S Ch	$G + Q_s + 0.6Q_{w4} + Q_{iE1} + Imp2$		5	1.00	LC11	Imp -X
				1	1.00	LC1	omapaino
				2	1.00	LC2	lumikuorma
				3	0.60	LC6	tuulikuorma -x sisäpaine
				4	1.00	LC7	nosturikuorma
CO29	S Ch	$G + Q_s + 0.6Q_{w4} + Q_{iE2} + Imp2$		5	1.00	LC11	Imp -X
				1	1.00	LC1	omapaino
				2	1.00	LC2	lumikuorma
				3	0.60	LC6	tuulikuorma -x sisäpaine
				4	1.00	LC8	nosturikuorma
CO30	S Ch	$G + Q_{w1} + Imp1$		5	1.00	LC11	Imp -X
				1	1.00	LC1	omapaino
				2	1.00	LC3	tuulikuorma +x sisäpaine
				3	1.00	LC10	Imp +X
				1	1.00	LC1	omapaino
CO31	S Ch	$G + Q_{w2} + Imp1$		2	1.00	LC4	tuulikuorma +x sisäimu
				3	1.00	LC10	Imp +X
				1	1.00	LC1	omapaino
CO32	S Ch	$G + Q_{w3} + Imp2$		2	1.00	LC5	tuulikuorma -x sisäimu
				3	1.00	LC11	Imp -X
				1	1.00	LC1	omapaino
CO33	S Ch	$G + Q_{w4} + Imp2$		2	1.00	LC6	tuulikuorma -x sisäpaine
				3	1.00	LC11	Imp -X
				1	1.00	LC1	omapaino
CO34	S Ch	$G + 0.7Q_s + Q_{w1} + Q_{iE1} + Imp1$		2	0.70	LC2	lumikuorma
				3	1.00	LC3	tuulikuorma +x sisäpaine
				4	1.00	LC7	nosturikuorma
				5	1.00	LC10	Imp +X
				1	1.00	LC1	omapaino
CO35	S Ch	$G + 0.7Q_s + Q_{w1} + Q_{iE2} + Imp1$		2	0.70	LC2	lumikuorma
				3	1.00	LC3	tuulikuorma +x sisäpaine
				4	1.00	LC8	nosturikuorma
				5	1.00	LC10	Imp +X
				1	1.00	LC1	omapaino
CO36	S Ch	$G + 0.7Q_s + Q_{w2} + Q_{iE1} + Imp1$		2	0.70	LC2	lumikuorma
				3	1.00	LC4	tuulikuorma +x sisäimu
				4	1.00	LC7	nosturikuorma
				5	1.00	LC10	Imp +X
				1	1.00	LC1	omapaino
CO37	S Ch	$G + 0.7Q_s + Q_{w2} + Q_{iE2} + Imp1$		2	0.70	LC2	lumikuorma
				3	1.00	LC4	tuulikuorma +x sisäimu
				4	1.00	LC8	nosturikuorma
				5	1.00	LC10	Imp +X
				1	1.00	LC1	omapaino
CO38	S Ch	$G + 0.7Q_s + Q_{w3} + Q_{iE1} + Imp2$		2	0.70	LC2	lumikuorma
				3	1.00	LC5	tuulikuorma -x sisäimu
				4	1.00	LC7	nosturikuorma
				5	1.00	LC11	Imp -X
				1	1.00	LC1	omapaino
CO39	S Ch	$G + 0.7Q_s + Q_{w3} + Q_{iE2} + Imp2$		2	0.70	LC2	lumikuorma
				3	1.00	LC5	tuulikuorma -x sisäimu
				4	1.00	LC8	nosturikuorma
				5	1.00	LC11	Imp -X
				1	1.00	LC1	omapaino
CO40	S Ch	$G + 0.7Q_s + Q_{w4} + Q_{iE1} + Imp2$		2	0.70	LC2	lumikuorma
				3	1.00	LC6	tuulikuorma -x sisäpaine
				4	1.00	LC7	nosturikuorma
				5	1.00	LC11	Imp -X
				1	1.00	LC1	omapaino
CO41	S Ch	$G + 0.7Q_s + Q_{w4} + Q_{iE2} + Imp2$		2	0.70	LC2	lumikuorma
				3	1.00	LC6	tuulikuorma -x sisäpaine
				4	1.00	LC8	nosturikuorma
				5	1.00	LC11	Imp -X
				1	1.00	LC1	omapaino

3.1 NODAL LOADS - BY COMPONENTS
- COORDINATE SYSTEM

LC1: omapaino

No.	On Nodes No.	Coordinate System	Force [kN]			Moment [kNm]		
			P_x / P_u	P_y / P_v	P_z / P_w	M_x / M_u	M_y / M_v	M_z / M_w
1	20-25	0 Global XYZ	0.000	0.000	-41.000	0.000	0.000	0.000
2	26	0 Global XYZ	0.000	0.000	-21.000	0.000	0.000	0.000
3	27	0 Global XYZ	0.000	0.000	-245.000	0.000	0.000	0.000

3.2 MEMBER LOADS

LC1: omapaino

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Load Parameters		
							Symbol	Value	Unit
1	Members	22	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-7.700	kN/m
2	Members	1,2,35,38, 44,45	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-2.400	kN/m
8	Members	6	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-7.700	kN/m
9	Members	9	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-7.700	kN/m
10	Members	13	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-7.700	kN/m
11	Members	15	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-7.700	kN/m

LC1
omapaino



LOADS

Project: M-kehä

Model: Tasokehä_Liite_B

Date: 23.9.2019

3.2 MEMBER LOADS

LC1: omapaino

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Load Parameters		
							Symbol	Value	Unit
12	Members	19	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-7.700	kN/m
13	Members	7	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-7.700	kN/m
14	Members	32	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-7.700	kN/m
15	Members	28	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-7.700	kN/m
16	Members	26	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-7.700	kN/m

3.1 NODAL LOADS - BY COMPONENTS
- COORDINATE SYSTEM

LC2: lumikuorma

No.	On Nodes No.	Coordinate System	Force [kN]			Moment [kNm]		
			P_X / P_U	P_Y / P_V	P_Z / P_W	M_X / M_U	M_Y / M_V	M_Z / M_W
1	27	0 Global XYZ	0.000	0.000	-24.000	0.000	0.000	0.000

3.2 MEMBER LOADS

LC2: lumikuorma

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Load Parameters		
							Symbol	Value	Unit
1	Members	6	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-13.400	kN/m
2	Members	22	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-13.400	kN/m
3	Members	26	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-13.400	kN/m
4	Members	28	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-13.400	kN/m
5	Members	32	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-13.400	kN/m
6	Members	7	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-13.400	kN/m
7	Members	19	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-13.400	kN/m
8	Members	15	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-13.400	kN/m
9	Members	13	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-13.400	kN/m
10	Members	9	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-13.400	kN/m

3.1 NODAL LOADS - BY COMPONENTS
- COORDINATE SYSTEM

LC3: tuulikuorma +x sisäpaine

No.	On Nodes No.	Coordinate System	Force [kN]			Moment [kNm]		
			P_X / P_U	P_Y / P_V	P_Z / P_W	M_X / M_U	M_Y / M_V	M_Z / M_W
1	27	0 Global XYZ	0.000	0.000	189.000	0.000	0.000	0.000
2	26	0 Global XYZ	0.000	0.000	-138.000	0.000	0.000	0.000

3.2 MEMBER LOADS

LC3: tuulikuorma +x sisäpaine

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Load Parameters		
							Symbol	Value	Unit
1	Members	1,45	Force	Uniform	z	True Length	p	6.700	kN/m
2	Members	2,5,44	Force	Uniform	z	True Length	p	4.300	kN/m
3	Members	4	Force	Uniform	z	True Length	p	6.700	kN/m
5	Members	1,45	Force	Uniform	z	True Length	p	-0.200	kN/m
6	Members	4	Force	Uniform	z	True Length	p	-0.200	kN/m
7	Members	2,5,44	Force	Uniform	z	True Length	p	0.200	kN/m
8	Members	35	Force	Uniform	XL	True Length	p	6.700	kN/m
9	Members	38	Force	Uniform	XL	True Length	p	4.300	kN/m
10	Members	6,7,9,13,15,19,22,26,28,32	Force	Uniform	ZL	True Length	p	0.200	kN/m

3.1 NODAL LOADS - BY COMPONENTS
- COORDINATE SYSTEM

LC4: tuulikuorma +x sisäimu

No.	On Nodes No.	Coordinate System	Force [kN]			Moment [kNm]		
			P_X / P_U	P_Y / P_V	P_Z / P_W	M_X / M_U	M_Y / M_V	M_Z / M_W
1	26	0 Global XYZ	0.000	0.000	-138.000	0.000	0.000	0.000
2	27	0 Global XYZ	0.000	0.000	189.000	0.000	0.000	0.000

3.2 MEMBER LOADS

LC4: tuulikuorma +x sisäimu

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Load Parameters		
							Symbol	Value	Unit
1	Members	1,4,45	Force	Uniform	z	True Length	p	0.300	kN/m
2	Members	2,5,44	Force	Uniform	z	True Length	p	-0.300	kN/m
4	Members	1,4,45	Force	Uniform	z	True Length	p	6.700	kN/m
5	Members	2,5,44	Force	Uniform	z	True Length	p	4.300	kN/m
6	Members	38	Force	Uniform	XL	True Length	p	4.300	kN/m
7	Members	35	Force	Uniform	XL	True Length	p	6.700	kN/m
8	Members	6,7,9,13,15,19,22,26,28,32	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-0.300	kN/m

LC2
lumikuormaLC3
tuulikuorma +x sisäpaineLC4
tuulikuorma +x sisäimu



LOADS

Project: M-kehä

Model: Tasokehä_Liite_B

Date: 23.9.2019

LC5
tuulikuorma -x sisäimu3.1 NODAL LOADS - BY COMPONENTS
- COORDINATE SYSTEM

LC5: tuulikuorma -x sisäimu

No.	On Nodes No.	Coordinate System	Force [kN]			Moment [kNm]		
			P_X / P_U	P_Y / P_V	P_Z / P_W	M_X / M_U	M_Y / M_V	M_Z / M_W
1	27	0 Global XYZ	0.000	0.000	-189.000	0.000	0.000	0.000
2	26	0 Global XYZ	0.000	0.000	138.000	0.000	0.000	0.000

3.2 MEMBER LOADS

LC5: tuulikuorma -x sisäimu

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Load Parameters		
							Symbol	Value	Unit
1	Members	2,44	Force	Uniform	z	True Length	p	-6.700	kN/m
2	Members	5	Force	Uniform	z	True Length	p	-6.700	kN/m
3	Members	1,4,45	Force	Uniform	z	True Length	p	-4.300	kN/m
4	Members	4	Force	Uniform	z	True Length	p	0.300	kN/m
5	Members	2,44	Force	Uniform	z	True Length	p	-0.300	kN/m
6	Members	5	Force	Uniform	z	True Length	p	-0.300	kN/m
7	Members	1,45	Force	Uniform	z	True Length	p	0.300	kN/m
8	Members	38	Force	Uniform	XL	True Length	p	-6.700	kN/m
9	Members	35	Force	Uniform	XL	True Length	p	-4.300	kN/m
10	Members	6,7,9,13, 15,19,22, 26,28,32	Force	Uniform	ZL	True Length	p	-0.300	kN/m

LC6
tuulikuorma -x sisäpaine3.1 NODAL LOADS - BY COMPONENTS
- COORDINATE SYSTEM

LC6: tuulikuorma -x sisäpaine

No.	On Nodes No.	Coordinate System	Force [kN]			Moment [kNm]		
			P_X / P_U	P_Y / P_V	P_Z / P_W	M_X / M_U	M_Y / M_V	M_Z / M_W
1	26	0 Global XYZ	0.000	0.000	138.000	0.000	0.000	0.000
2	27	0 Global XYZ	0.000	0.000	-189.000	0.000	0.000	0.000

3.2 MEMBER LOADS

LC6: tuulikuorma -x sisäpaine

No.	Reference to	On Members No.	Load Type	Load Distribution	Load Direction	Reference Length	Load Parameters		
							Symbol	Value	Unit
1	Members	2,5,44	Force	Uniform	z	True Length	p	0.200	kN/m
2	Members	1,45	Force	Uniform	z	True Length	p	-0.200	kN/m
3	Members	4	Force	Uniform	z	True Length	p	-0.200	kN/m
4	Members	5	Force	Uniform	z	True Length	p	-6.700	kN/m
5	Members	2,44	Force	Uniform	z	True Length	p	-6.700	kN/m
6	Members	1,45	Force	Uniform	z	True Length	p	-4.300	kN/m
7	Members	4	Force	Uniform	z	True Length	p	-4.300	kN/m
8	Members	35	Force	Uniform	XL	True Length	p	-4.300	kN/m
9	Members	38	Force	Uniform	XL	True Length	p	-6.700	kN/m
11	Members	6,7,9,13, 15,19,22, 26,28,32	Force	Uniform	ZL	True Length	p	0.200	kN/m

LC7
nosturikuorma3.1 NODAL LOADS - BY COMPONENTS
- COORDINATE SYSTEM

LC7: nosturikuorma

No.	On Nodes No.	Coordinate System	Force [kN]			Moment [kNm]		
			P_X / P_U	P_Y / P_V	P_Z / P_W	M_X / M_U	M_Y / M_V	M_Z / M_W
1	29	0 Global XYZ	0.000	0.000	-293.000	0.000	0.000	0.000

LC8
nosturikuorma3.1 NODAL LOADS - BY COMPONENTS
- COORDINATE SYSTEM

LC8: nosturikuorma

No.	On Nodes No.	Coordinate System	Force [kN]			Moment [kNm]		
			P_X / P_U	P_Y / P_V	P_Z / P_W	M_X / M_U	M_Y / M_V	M_Z / M_W
1	35	0 Global XYZ	0.000	0.000	-293.000	0.000	0.000	0.000

LC10
Imp +X

3.14 IMPERFECTIONS

LC10: Imp +X

No.	Reference to	On Members No.	Dir.	Inclination 1/φ ₀ δ [-,mm]	Precamber L/e ₀ e ₀ [-,mm]	Apply e ₀ from ε ₀ [-]	Comment
1	Set of members	1,2	z	346.41	0.00	-	

LC11
Imp -X

3.14 IMPERFECTIONS

LC11: Imp -X

No.	Reference to	On Members No.	Dir.	Inclination $1/\varphi_0 \delta$ [-,mm]	Precamber $L/e_0, e_0$ [-,mm]	Apply e_0 from ε_0 [-]	Comment
1	Set of members	1	z	-346.41	0.00	-	
2	Set of members	2	z	-346.41	0.00		